

*ESTUDIO PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE CAPTACIÓN DE AGUA
DEL LAGO DE TOTA A CARGO DE COSERVICIOS S.A. E.S.P.*

JAVIER EDUARDO ROJAS COLEMARES
FERNANDO TIBAMOSO PEDRAZA

UNIVERSIDAD PEDAGOGICA Y TECNOLOGICA DE COLOMBIA
FACULTAD SECCIONAL DUITAMA
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTROMECHANICA
DUITAMA

2017

ESTUDIO PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE CAPTACIÓN DE AGUA
DEL LAGO DE TOTA A CARGO DE COSERVICIOS S.A. E.S.P.

JAVIER EDUARDO ROJAS COLEMARES
FERNANDO TIBAMOSO PEDRAZA

TESIS DE GRADO EN LA MODALIDAD DE MONOGRAFÍA, PRESENTADO
COMO REQUISITO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
ELECTROMECHANICO

DIRETOR U.P.T.C.
ING. ORLANDO DIAZ PARRA
DOCENTE U.P.T.C

COORDINADOR COSERVICIOS S.A E.S.P.
ING. PEDRO NEL GONZLEZ COLMENARES

UNIVERSIDAD PEDAGOGICA Y TECNOLOGICA DE COLOMBIA
FACULTAD SECCIONAL DUITAMA
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTROMECHANICA
DUITAMA

2017

DEDICATORIA

A NUESTRAS FAMILIAS
A AMIGOS, COMPAÑEROS DE UNIVERSIDAD

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

Nuestro director Ing. ORLANDO DÍAZ PARRA por sus consejos y orientaciones. A COSERVICIOS S.A E.S.P y en especial al Ing. PEDRO NEL GONZALEZ COLMENARES por ser parte importante de este proyecto. A nuestros padres quienes hicieron posible este logro.

Mil gracias.

CONTENIDO

RESUMEN	13
INTRODUCCIÓN	14
1.SIFON DE CAPTACIÓN DEL LAGO DE TOTA	15
1.1.Sistema De Captación De Tota.	15
1.2.Cálculos del circuito de potencia y selección del arrancador y de las protecciones adecuadas del motor.	20
1.3.El circuito de control del motor propuesto.	25
1.4.Alimentación de la red de energía.	27
2.FLUJO DE FLUIDOS	28
2.1.HIDRÁULICA. Y CONCEPTOS.	28
2.2.La ecuación de energía con fricción y trabajo extremo.	31
2.3.Flujo laminar.	32
2.4.Flujo turbulento y zona de transición.	32
2.5.Numero De Reynolds.	33
2.6.PERDIDAS DE ENERGÍA EN EL SISTEMA	34
2.6.1.Ecuación de Darcy.	34
2.6.2.Factor de fricción.	34
2.6.3.Factor de fricción para flujo turbulento.	34
2.6.5.Perfil de velocidad para flujo laminar..	36
2.6.6.Perfil de velocidad para flujo turbulento.	36
2.7.Aire en la tubería	38
2.7.1.Caudal crítico.	38
2.7.2.Ecuaciones para determinar el caudal crítico	39
2.7.3.Cavitación o aspiración en vacío.	39
2.8. VACÍO	40
2.8.1.Vacío.	40
2.8.2.Clasificación del vacío.	40
2.8.3.Fugas, desgasificación y retroflujo.	40
2.8.5.Trayectoria libre media (<i>I</i>).	42

2.8.6.Flujo estacionario.	42
2.8.7.Conductancia.	43
3. EVALUACION DEL SIFÓN	47
3.1. CÁLCULOS HIDRÁULICOS	47
3.2.CALCULO DE ENTREGA LIBRE	53
3.3.Numero de Reynolds para el flujo del sifón de tota	55
3.4.Calculo del factor de fricción del tubo del sifón.	55
3.5.Perdidas del sifón de tota por fricción.	
3.6.Perfil de velocidad del tubo sifón.	57
3.7.Caudal crítico para el sifón de Tota.	59
3.8.CALCULO DEL COEFICIENTE DE CAVITACIÓN DEL SIFÓN DE TOTA.	60
3.9. CÁLCULOS PARA LA ESTACIÓN DE VACÍO DEL LAGO DE TOTA.	63
3.9.1.Cálculos resistividad..	67
3.9.2.Calculo de capacidad de bombeo efectiva en la entrada de la bomba.	76
3.9.3.Tiempo de bombeo asumiendo que no hay fugas y desgasificación.	78
3.10.Diseño intercambiador de calor.	81
3.10.2.Dimensionamiento del intercambiador de calor para enfriar el fluido de trabajo de la bomba de vacío.	81
4.EVALUACIÓN DEL PROYECTO Y CAMBIOS A REALIZAR AL SISTEMA.	85
5.CONCLUSIONES.	88
6.RECOMENDACIONES.	89
BIBLIOGRAFÍA	90
ANEXOS	91

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Valores de la rugosidad relativa para diferentes materiales.....	35
Tabla 2. Numero de Knudsen.....	43
Tabla 3. Cálculos de presión del tramo 2 a 3 del sifón.....	50
Tabla 4. Calculo presión tramo 3 a 4 del sifón.....	51
Tabla 5. Valores de presión del tramo 4 y 5 del sifón.....	53
Tabla 6. Cálculos del perfil de velocidad para el tubo sifón de Tota.....	58
Tabla 7. Con los σ ya calculados, del tramo 2 a 3 del tubo sifón de Tota.....	60
Tabla 8. Coeficiente de cavitación del tubo sifón de Tota. Para el tramo 3 a 4.....	61
Tabla 9. Coeficiente de cavitación del tubo sifón de Tota. Para el tramo 4 a 5.....	62
Tabla 10. Tabla 10. Rangos de operación de las bombas de vacío.....	64
Tabla 11. Tipos de vacuómetro y rangos de operación.....	65
Tabla 12. <i>Presión contra distancia media libre</i>	66

LISTA DE GRÁFICAS

pág.

Grafica 1. Presión contra trayectoria media libre.....42

Grafica 2. Del perfil de velocidad de media sección del perfil viéndose que la velocidad en el centro del tubo es máxima y en la pared es cero.....59

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Sistema sifón de Tota.....	15
Figura 2. Esquema válvula 700 mm y válvulas de entrega del sifón de Tota.....	16
Figura 3. Estación de vacío del sistema sifón de Tota.....	17
Figura 4. Cámara de vacío.....	18
Figura 5. Bomba de vacío Hydral de anillo liquido de dos y etapas de 7.5 H.....	19
Figura 6. Circuito de potencia motor de 7.5 HP.....	22
Figura 7. Tablero de control bomba de vacío.....	23
Figura 8. Vacuómetro vegabar 14.....	23
Figura 9. Señal normalizada vegabar 14 de la cámara de vacío.....	24
Figura 10. Controlador sd16a SHIMADEN.....	24
Figura 11. Circuito de control lógica cableada de la bomba de vacío.....	25
Figura 12. Esquema de conexión trasformador-generator.....	27
Figura 13 Presión de trabajo del sistema sifón.....	30
Figura 14. Representación perfil de flujo laminar.....	32
Figura 15. Representación flujo turbulento.....	32
Figura 16. Esquema rugosidad relativa.....	35
Figura 17. Perfil de velocidad para flujo laminar.....	36
Figura 18. Perfil de velocidad para flujo turbulento.....	37
Figura 19. Formación de un soquete por la entrada de aire en un sistema.....	38
Figura 20. Implosión de una burbuja.....	39
Figura 21. Esquema simplificado estación de vacío.....	44
Figura 22. Esquema tubo sifon de Tota.....	48
Figura 23. Mapa conceptual de bombas de vacío.....	63
Figura 24. Esquema estación de vacío.....	67
Figura 25. Esquema conducción caso 1.....	68
Figura 26. Esquema conducción caso 2	70
Figura 27. Esquema conducción caso 3	72
Figura 28. Esquema conduccion caso 4.....	74
Figura 29. Formación de las burbujas por el efecto del vacío en el sifón.....	78
Figura 30. Intercambiador de calor.....	82
Figura 31. Valvula de purga A.R.I.....	86

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Orígenes del tubo sifón del lago de Tota.....	91
ANEXO B. Diagrama de Moody.....	93
ANEXO C. Caudales del tubo sifón.....	94
ANEXO D . Características de las bombas de vacío de anillo líquido.....	95
ANEXO E. Dimensiones de tuberías cedula 40.....	97
ANEXO F. Propiedades del agua.....	98
ANEXO G. Niveles del lago de tota en los últimos años.....	99
ANEXO H. Manual operativo del tubo sifón.....	100
ANEXO I. Plano tubo sifón.....	101
ANEXO J. Plano estación de vacío.....	102
ANEXO K. Plano nueva estación de vacío.....	103

GLOSARIO

ACERÍA: técnica del tratamiento del mineral de hierro para obtener diferentes tipos de éste o de sus aleaciones.

AGUA POTABLE: agua que por reunir los requisitos organolépticos, físicos, químicos y microbiológicos, en las condiciones señaladas en el decreto 475 de 1998, puede ser consumida por la población humana sin producir efectos adversos a la salud.

CAPTACIÓN: conjunto de estructuras necesarias para obtener el agua de la fuente de abastecimiento.

CAUDAL: cantidad de fluido que circula a través de una sección del ducto por unidad de tiempo. Normalmente se identifica como el flujo volumétrico o volumen que pasa por un área dada en la unidad de tiempo.

CAVITACIÓN: es el cambio súbito de fase de líquido a vapor que ocurre siempre que la presión local es igual o menor que la presión de vapor.

CEBADO DEL SIFÓN: se dice que el sifón esta cebado cuando el sifón ha comenzado a funcionar o se cargó completamente el tubo.

CUMBRE DEL SIFÓN: se le denomina al punto más alto del sifón donde generalmente se debe extraer el aire para crear el vacío.

EMBALSE: es un depósito de agua que se forma de manera artificial, lo más adecuado es el cierre de un valle a través de un dique para almacenar las aguas de un río o arroyo.

HIDRÁULICA: es una rama de la mecánica de fluidos y ampliamente presente en la ingeniería que se encarga del estudio de las propiedades mecánicas de los líquidos. Todo esto depende de las fuerzas que se interponen con la masa y a las condiciones a que esté sometido el fluido, relacionadas con la viscosidad de este.

OPTIMIZAR: proceso de diseño y o construcción para lograr la mejor armonía y compatibilidad entre los componentes de un sistema o incrementar su capacidad o la de sus componentes, aprovechando al máximo todos los recursos disponibles.

PERMEABILIDAD: se afirma que un material es permeable si deja pasar a través de él en una cantidad apreciable de fluido en un tiempo dado.

RUGOSIDAD: es el conjunto de irregularidades que posee una superficie, la mayor o menor rugosidad de una superficie depende de su acabado superficial.

SELLANTE: Es un líquido que debe ser incompresible o casi incompresible como agua o aceite el cual hace el efecto en la bomba como el equivalente al cilindro en un sistema pistón cilindro.

TIPTON: firma R.J TIPTON y asociados de Colombia.

TUNEL: se trata de una vía subterránea que, por lo general, se abre de modo artificial con el objetivo de permitir la comunicación entre dos lugares. En algunos casos, los túneles se crean para alojar tuberías.

TUBERÍA: ducto de sección circular para el transporte de agua.

VACÍO: es una región donde la densidad de partículas es muy baja, como por ejemplo la de una cavidad cerrada donde la presión del aire u otros gases es menor que la atmosférica.

RESUMEN

El presente estudio consiste en la optimización del sistema de captación de agua del lago de Tota realizada mediante un sistema sifón invertido que es operado por COSERVICIOS S.A E.S.P. Se emplea este método sifón para sustituir el sistema de bombeo donde el trabajo de la bomba es constante mientras con el sistema sifón la presión atmosférica es la que realiza el trabajo de captación. En el momento el proceso de cebado del sifón se está realizando con una bomba de anillo líquido de dos etapas de 7.5 HP sin recirculación y se planteará diseñar un sistema de circulación total lo que le dará un mejor control de la temperatura del agua de servicio de la bomba.

Inicialmente se hizo una estimación de las partes que se pueden intervenir del sistema sifón. Después de hacer el análisis se decidió que en la tubería de 36 pulgadas no se van a plantear cambios, pero es necesario dar más paso a las válvulas de entrega del sifón para superar el caudal crítico del sistema y hacer que las burbujas de aire que entren al sifón sigan aguas abajo para evitar la formación de soquetes.

Para optimizar el sistema se examinó el control de la bomba de anillo y su circuito de potencia, incluida las protecciones y el arrancador, dando como resultado que se requiere la instalación de un paro de emergencia y un botón de apagado. Las protecciones son adecuadas, pero el arrancador directo existente es perjudicial y se requiere un arrancador suave para el motor.

Por otra parte se examinó la disponibilidad eléctrica encontrándose que es apropiada y confiable por la redundancia entre el suministro de energía por la red local y la disponibilidad de una planta auxiliar diésel de 27 kVA.

Por último, la tubería de conexión entre la bomba de vacío y la cámara de vacío es compleja por lo que se realizaron cálculos y se recomendó una configuración en la que se incluyó el diseño de un intercambiador de calor para mantener la temperatura ideal de trabajo de la bomba para poder hacer una recirculación total.

INTRODUCCIÓN

El presente estudio plantea la posibilidad de mejorar el funcionamiento del sistema sifón del lago de Tota, mediante el estudio del componente hidráulico y de vacío para buscar un mejor desempeño del sifón, mediante cambios como en el sistema de conexión bomba- cámara de vacío y el diseño de un sistema de circulación total del líquido de servicio de la bomba. También se realizó la elección adecuada de las protecciones eléctricas del motor.

El documento tiene un punto de partida que expresa conceptos de hidráulica utilizados en el proyecto, y la fundamentación de vacío y principios de funcionamiento de la bomba de vacío, para realizar los cálculos del proyecto.

Se realizó los cálculos apoyados en información proporcionada por COSERVICIOS S.A E.S.P. Como topografía de la tubería, presión en la entrega del sifón, presión en la cresta del sifón y caudal del sifón y el histórico de los niveles del lago del año 2005 al 2015. El objetivo de estos cálculos es encontrar teóricamente la suficiente información del sistema para hacer comparaciones con lo que arroja los equipos de medición del sifón, y así rediseñar la estación de vacío, para mejorar el funcionamiento del sifón y de la bomba.

Igualmente se hace un manual de operación del sistema para que los operadores tengan mejor conocimiento de cómo manipular el sifón.

1. SIFON DE CAPTACIÓN DEL LAGO DE TOTA

En este capítulo se resalta las partes fundamentales del sifón, también en qué condiciones se encuentra, y se hacen los cálculos eléctricos y de protecciones del motor, también se evalúa el circuito de control de la bomba.

- 1.1. Sistema De Captación De Tota.** Es un sifón invertido por que toma el agua del lago y esta agua tiene que subir hasta la cresta o estación de vacío que está a un nivel de altura superior que el del lago y que las válvulas de entrega del sifón, además todo el tramo ascendente y parte del tramo descendente tiene una presión menor que la atmosférica. (ver figura 1).

Figura 1. Sistema sifón de Tota



Fuente: Autores del proyecto

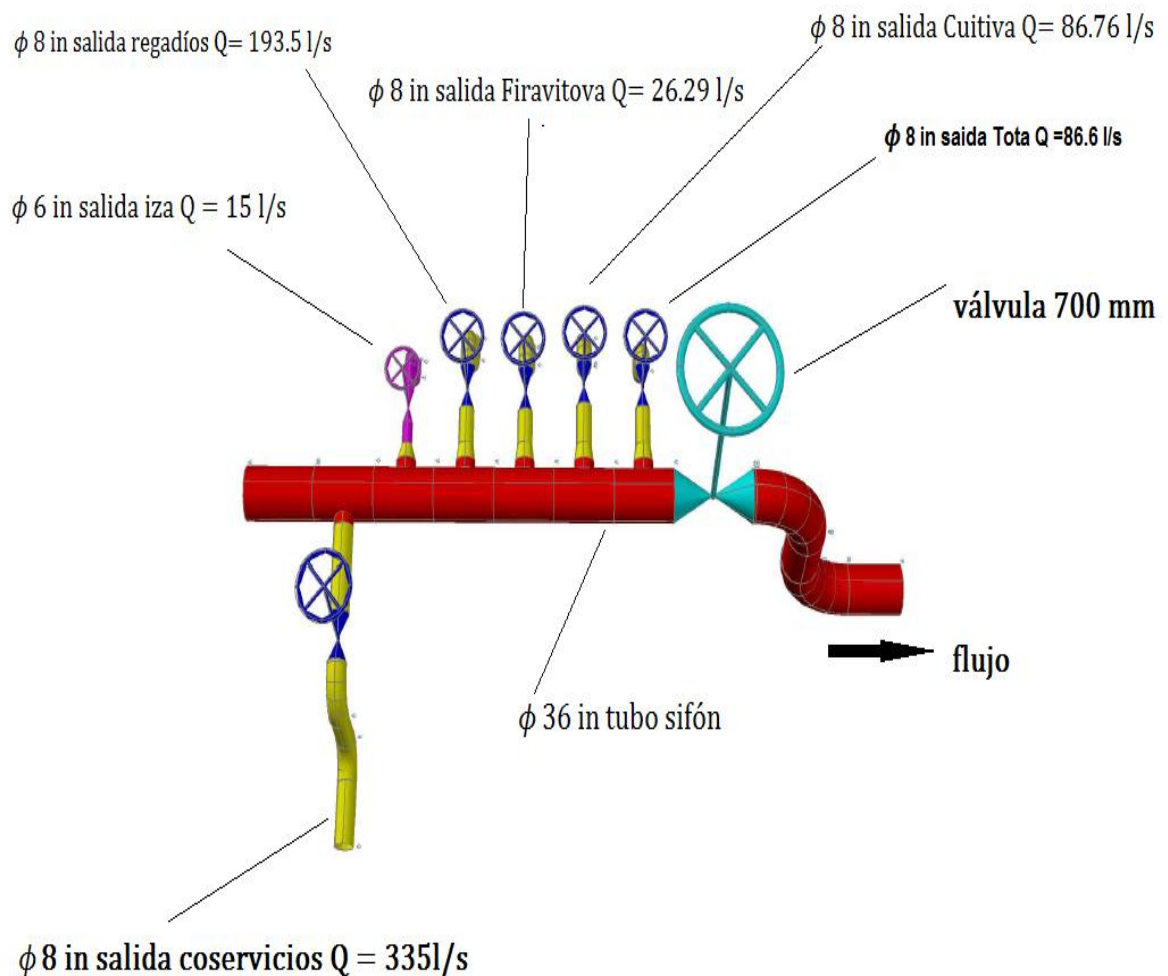
Se puede dividir en cuatro partes fundamentales:

- **La tubería.** Está construida en láminas de acero de 12.7 mm de espesor, roladas y soldadas para formar un tubo de secciones de 6 metros, con 0.91 m de diámetro interior. El último estudio realizado para determinar el espesor de pared del tubo fue realizado en 1981 y concluyo que era de 10 mm y fue realizado por la firma HIDROESTUDIOS LTDA.

La tubería está en tramos de 125 m que están sumergidos en el lago y presentan corrosión externa ya que el tubo está en contacto con las aguas del lago, 138.82 m están enterrados y se desconoce las condiciones externas de la tubería y 367.84 m están dentro del túnel lo cual facilitaría un poco la inspección del tubo, pero no se conoce mucho sobre el estado físico del mismo ya que el túnel es bastante reducido y además tiene pequeños derrumbes que impiden la entrada de personal.

- **La pipa.** Está construida en láminas de acero roladas y soldadas en forma de codo uno de los extremo esta soldado al tubo y el otro es el que hace la succión. En esta parte, tiene un enmallado para evitar que succione elementos extraños que puedan ocasionar taponamientos o daños a las válvulas del sistema.
- **Válvula de 700 mm.** El sifón termina en una válvula de 700 mm unida a la tubería por medio de bridas y pernos y la válvula controla el paso de agua entre el canal de captación por gravedad y el tubo sifón, pero generalmente está cerrada y la entrega del sifón se hace por unas ramificaciones de diferentes diámetros a unos metros atrás de la válvula de 700mm como se muestra en la figura 2.

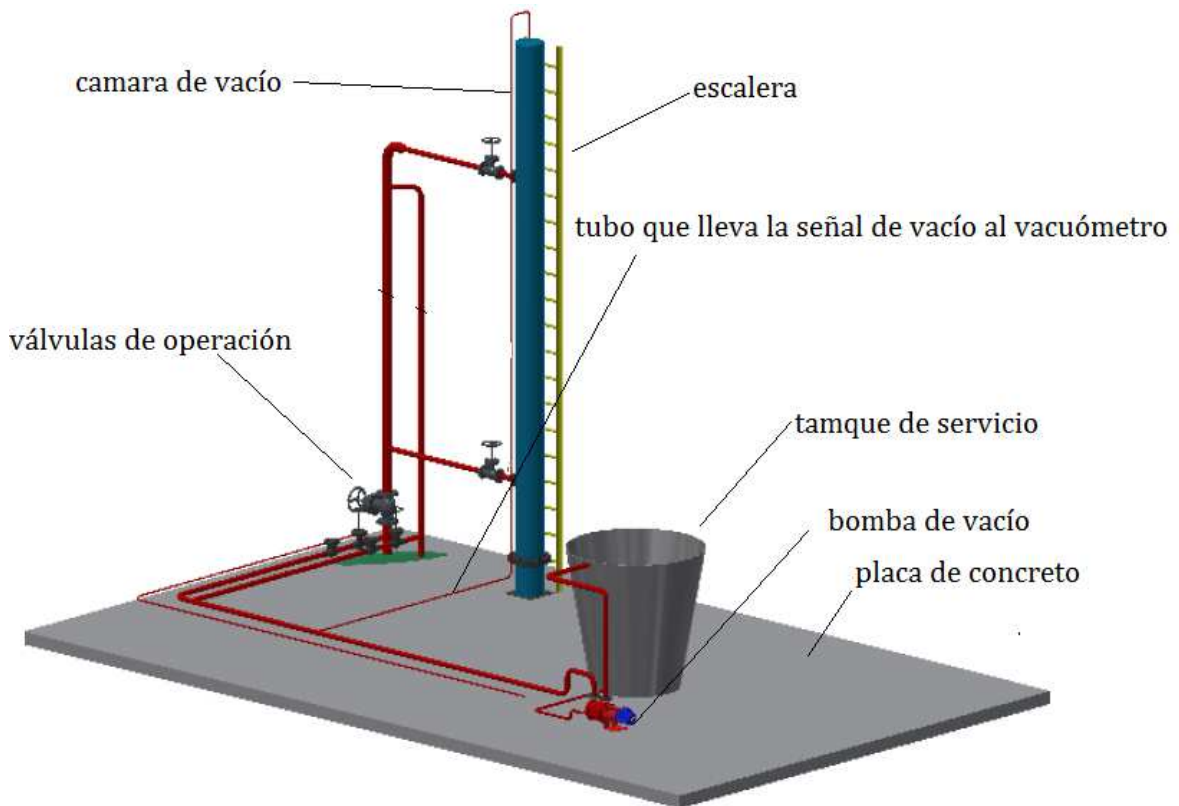
Figura 2. Esquema válvula 700 mm y válvulas de entrega del sifón de Tota



Fuente: Autores del proyecto

- **Estación de vacío.** Consta de principalmente de la bomba y su respectiva cámara de vacío y las conexiones entre la bomba, la cámara y el tubo sifón. También consta de un tanque de expansión. (ver figura 3).

Figura 3. Estación de vacío del sistema sifón de Tota

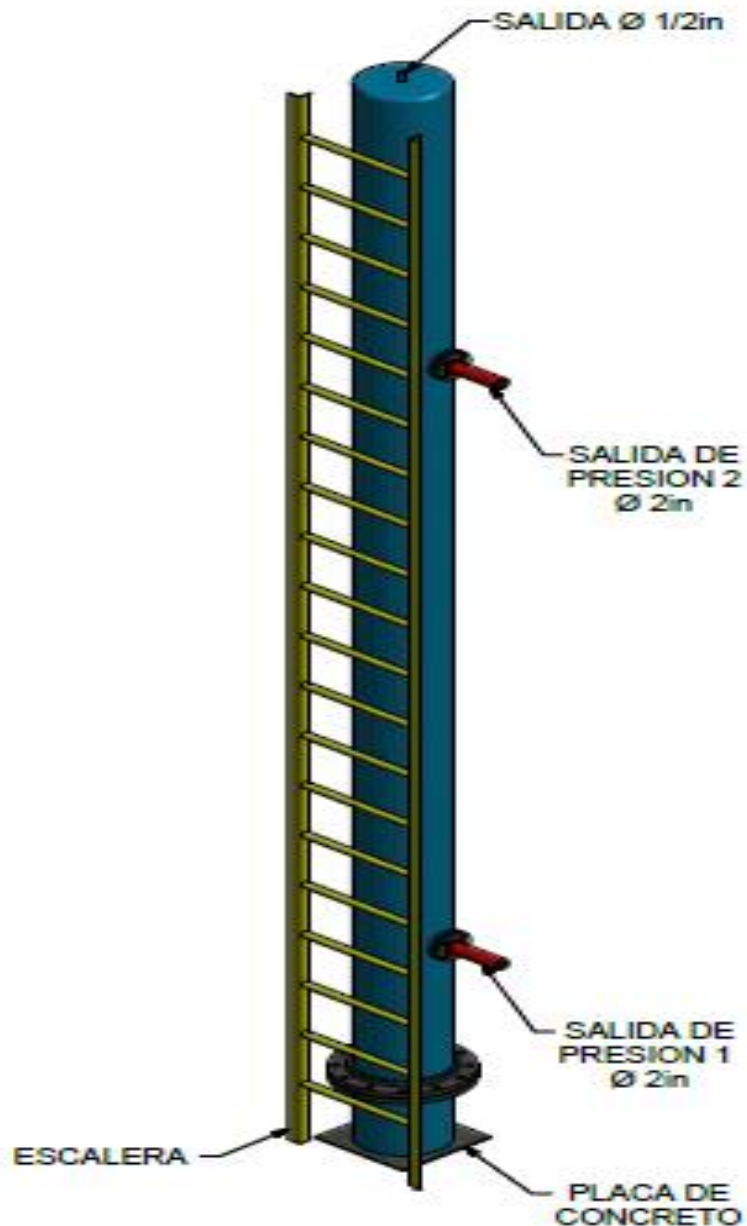


Fuente: Autores del proyecto

La cámara de vacío es de forma cilíndrica de 6.36 m de alto y 28 cm de diámetro y está asegurada por medio de 20 pernos de 19 mm por 127mm a un flanche metálico que está anclado al suelo por medio de vaciado de concreto.

Para efectos de mantenimiento, la cámara consta de una escalera con peldaños. Además en la parte superior tiene una conexión de tubería galvanizada de 1 in para llevar la señal de presión al vacuómetro y dos conexiones más en la parte lateral de la cámara las cuales, una es para realizar el vaciado en la parte superior y otra en la parte inferior (ver figura 4.).

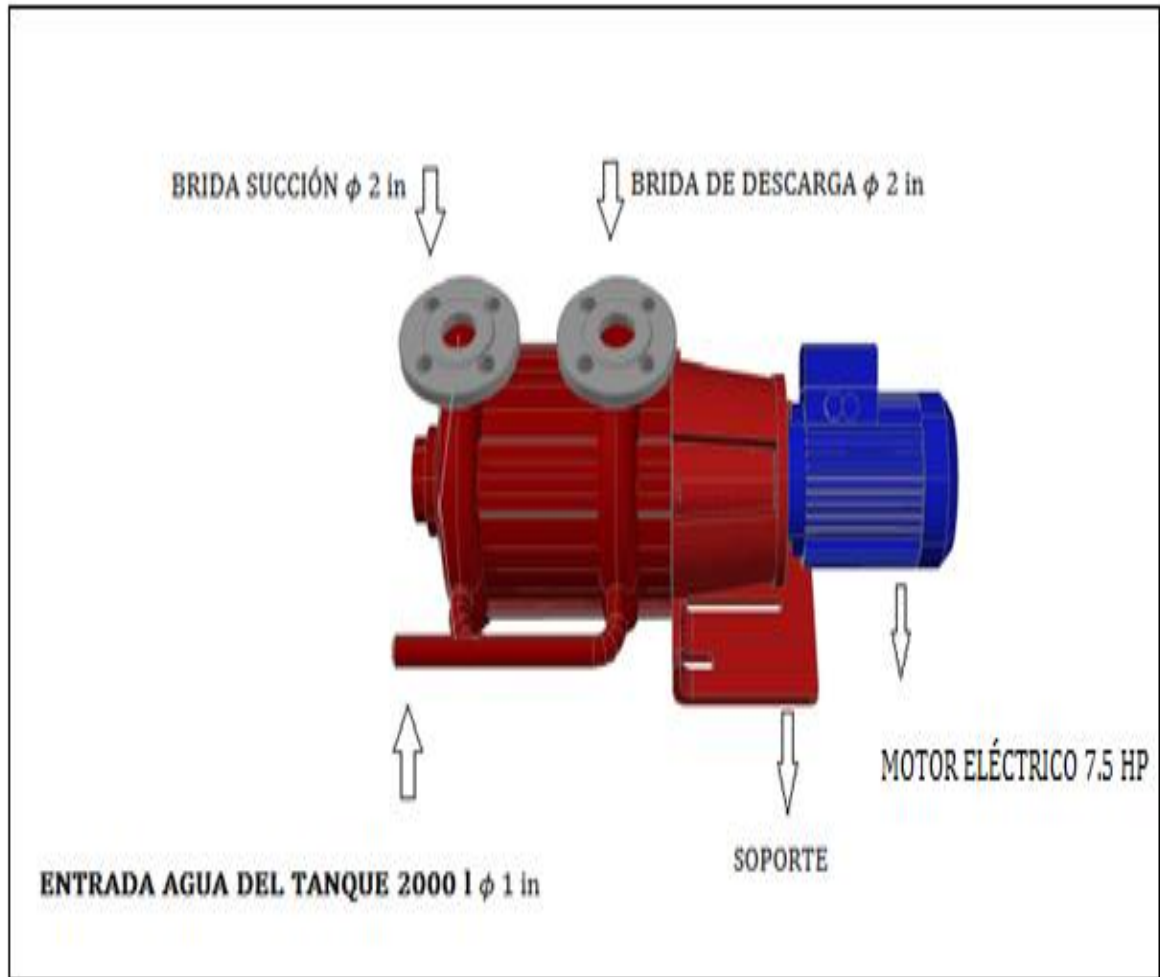
Figura 4. Cámara de vacío



Fuente: Autores del proyecto

Bomba. Actualmente se está usando una bomba de vacío Hydral de anillo líquido de dos etapas de eje libre, accionada por un motor eléctrico de 7.5 HP trifásico a 1800 rpm marca Usmotors. El acople entre la bomba y el motor es marca Rexnord tipo omega. Está funcionando sin recirculación y toma el agua de un tanque de expansión plástico de 2000 l (ver figura 5.).

Figura 5. Bomba de vacío Hydral de anillo líquido de dos y etapas de 7.5 HP



Fuente: Autores del proyecto

El Control de la bomba: consta de dos partes fundamentales. El circuito de potencia y el circuito de control. Hay cosas que se deben mejorar. En cuanto al circuito de potencia, se observa que el motor tiene un arranque directo lo cual es perjudicial ya que la corriente nominal de arranque del motor es elevada y deteriora el devanado del motor cada vez que arranca, lo que reduce la eficiencia del motor y aumenta el consumo de energía. También el circuito existente carece de arrancador suave y de las protecciones existentes no hay certeza si están bien elegidas. Teniendo en cuenta que la bomba del sifón es un equipo crítico, porque no hay una bomba auxiliar, se debe proteger frente a daños por sobrecarga o cortos circuitos.

1.2. Cálculos del circuito de potencia y selección del arrancador y de las protecciones adecuadas del motor.

Datos del motor eléctrico:

$$P = 7.5 \text{ HP} = 5595 \text{ W}$$

$$FP = 0.8$$

$$FS = 1.3$$

$$V = 208 \text{ V AC}$$

Corriente nominal del motor

$$I_n = \frac{P}{\sqrt{3} * V * FP} \quad (1)$$

Dónde:

FP= factor de potencia

P = potencia

V= voltaje

I_n = corriente nominal

$$I_n = \frac{5595 \text{ W}}{\sqrt{3} * 208 \text{ V} * 0.8} = 19.41 \text{ A}$$

- Selección guardamotor

$$I_{GM} = I_n * FS * 1.25 \quad (2)$$

Dónde:

I_{GM} = corriente guardamotor

$$I_{GM} = 19.41 \text{ A} * 1.3 * 1.25 = 31.54 \text{ A}$$

Guardamotor comercial que sirva para el motor.

GV2LE32 SCHNEIDER ELECTRIC

- Selección contactor

$$I_c = I_n * FS * 1.05 \quad (3)$$

Dónde:

I_c = corriente contactor

$$I_c = 19.41 \text{ A} * 1.3 * 1.05 = 26.49 \text{ A}$$

- Contactor comercial que se ajuste al motor.

LCD1D32 SHNEIDER ELECTRIC.

- Selección de relé térmico

La corriente del contactor es la misma del relé térmico entonces se buscó en catálogos comerciales uno que se ajuste al motor.

LRD32 SHNEIDER ELECTRIC.

- Selección de arrancador suave

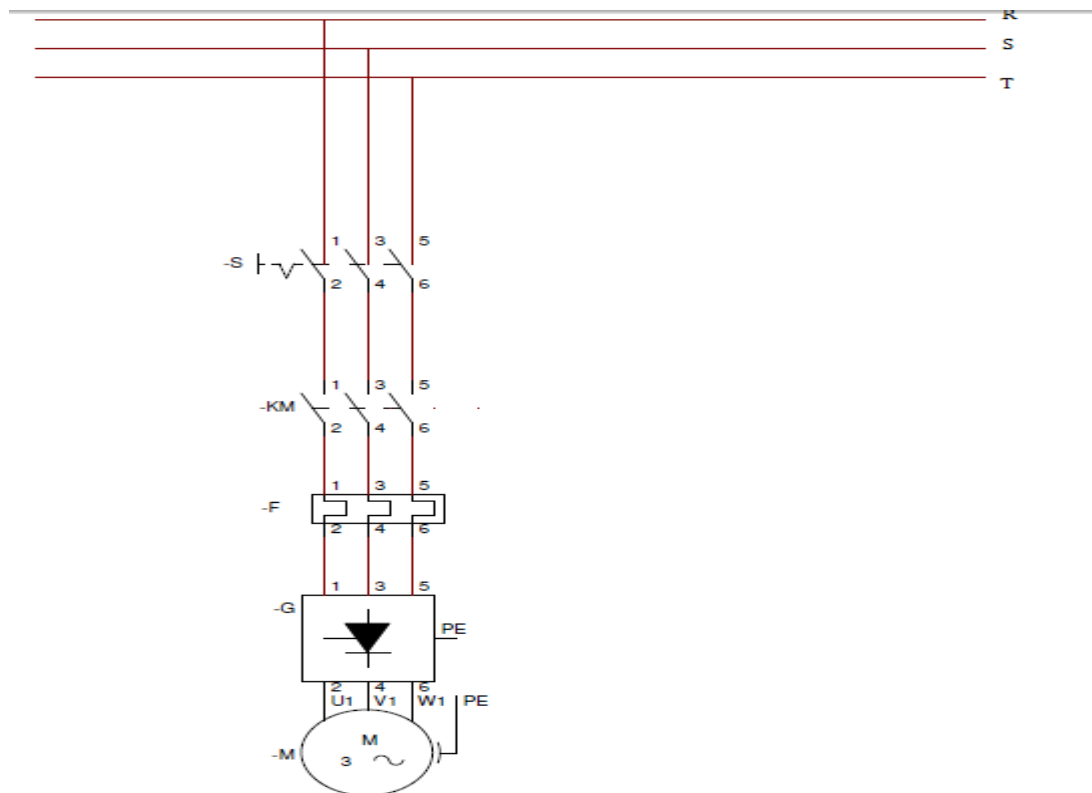
Se eligió un arrancador suave de 32 A debido a que uno con un rango mayor de corriente es más costoso y este arrancador tiene la capacidad de soportar la corriente del motor

- Arrancador 3RW 4027- 1BB14 SIEMENS costo 1 223 000 pesos.

Ahora ya obtenidas las corrientes y elegido las protecciones del motor se procedió a hacer el circuito de potencia del motor y se representa en la figura 6.

En este esquema están los puntos de conexión y también las líneas de alimentación de baja tensión.

Figura 6. Circuito de potencia motor de 7.5 HP.



Fuente: Autores del proyecto

- Circuito de control

Fue implementado por Acerías Paz Del Rio Votorantim S.A. es importante resaltar que si ocurre una falla en el sistema ya sea por relé térmico o por algún otro evento, el circuito da una señal visual por medio de un bombillo, para que el operador reinicie el sistema o pase el reporte de la falla. Pero hay que tener en cuenta que el operador del sifón no está todo el tiempo pendiente del tablero de control porque, el sifón tiene 600 m metros de longitud y sería grave que no se percatará de la falla y el sifón se descargue, y se tendría que cebar el sifón nuevamente desde cero a consecuencia se suspendería el servicio alrededor de un día. Entonces se plantea implementar un dispositivo sonoro que de una señal oportuna cuando se salte una protección y así se tendrá una mayor confianza al sistema.

También es importante resaltar que este circuito funciona de dos maneras: automático y manual, pero aunque funciona, le hacen falta partes fundamentales como un paro de emergencia y un botón de apagado. En cuanto al modo automático se evaluará su funcionamiento. La figura 7 muestra el tablero de control actual.

Figura 7. Tablero de control bomba de vacío



Fuente: foto COSERVICIOS S.A E.S.P.

Principio de funcionamiento del tablero de control, este monitorea la presión de la cámara de vacío mediante un vacuómetro vegabar 14 (ver figura 8) el cual tiene una membrana interna, y una cara de la membrana está en contacto con el vacío y la otra cara de la membrana está unida a un condensador, el cual cambia su capacitancia según cambie el área por el movimiento de la membrana.

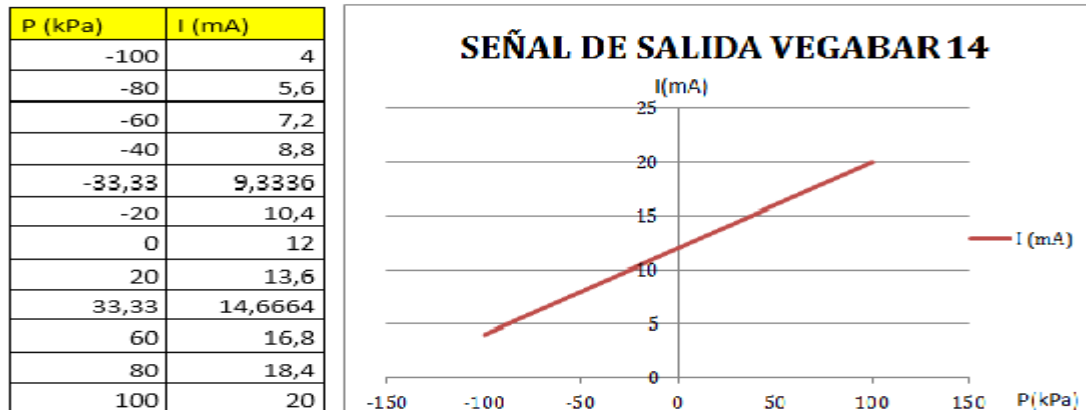
Figura 8. Vacuómetro vegabar 14.

Datos técnicos	
Rangos de medición	-1 ... +60 bar/-100 ... +6000 kPa (-14.5 ... +870 psig)
Rango de medición mínimo	+0,1 bar/+10 kPa (+1.45 psig)
Desviación curva característica	0,3 %
Conexión a proceso	Rosca a partir de G½, ½ NPT
Temperatura de proceso	-40 ... +100 °C (-40 ... +212 °F)
Temperatura ambiente, de almacenaje y de transporte	-40 ... +80 °C (-40 ... +176 °F)
Tensión de trabajo	12 ... 36 V DC

Fuente. www.vegabar.com

El vacuómetro envía una señal de corriente normalizada de 4 a 20 mA, para un rango de medición de presión de -100 a + 100 kPa y la señal se ve en la figura 9.

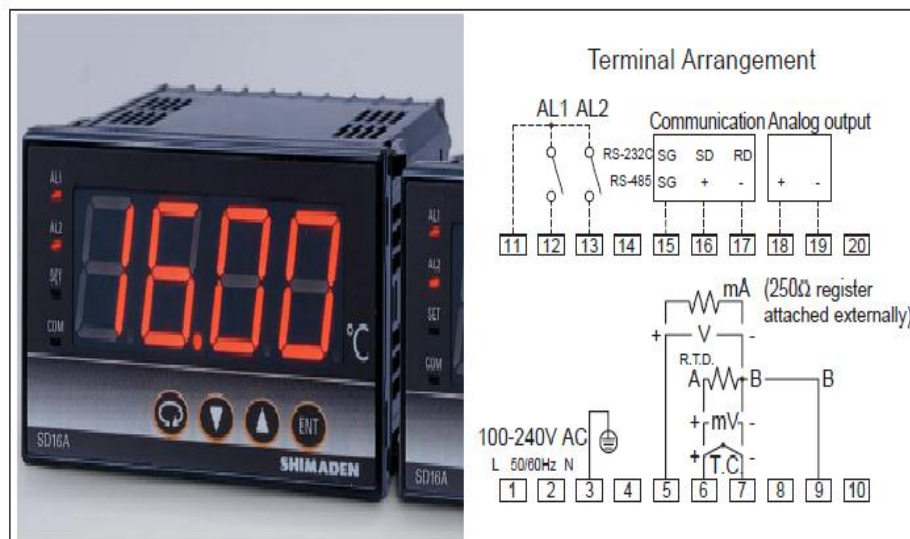
Figura 9. Señal normalizada vegabar 14 de la cámara de vacío.



Fuente: Autores del proyecto

La señal normalizada que envía el vacuómetro ingresa al SD16A, el cual es un controlador de compuerta por histéresis. A este dispositivo se le puede variar el rango de histéresis, para que cierre los contactos analógicos AL1 Y AL2, los cuales dan la señal a los contactores que son los que tienen poder de corte. El SD16A también proporciona el voltaje para que funcione el vacuómetro. La figura 10 muestra el controlador y el esquema de conexión.

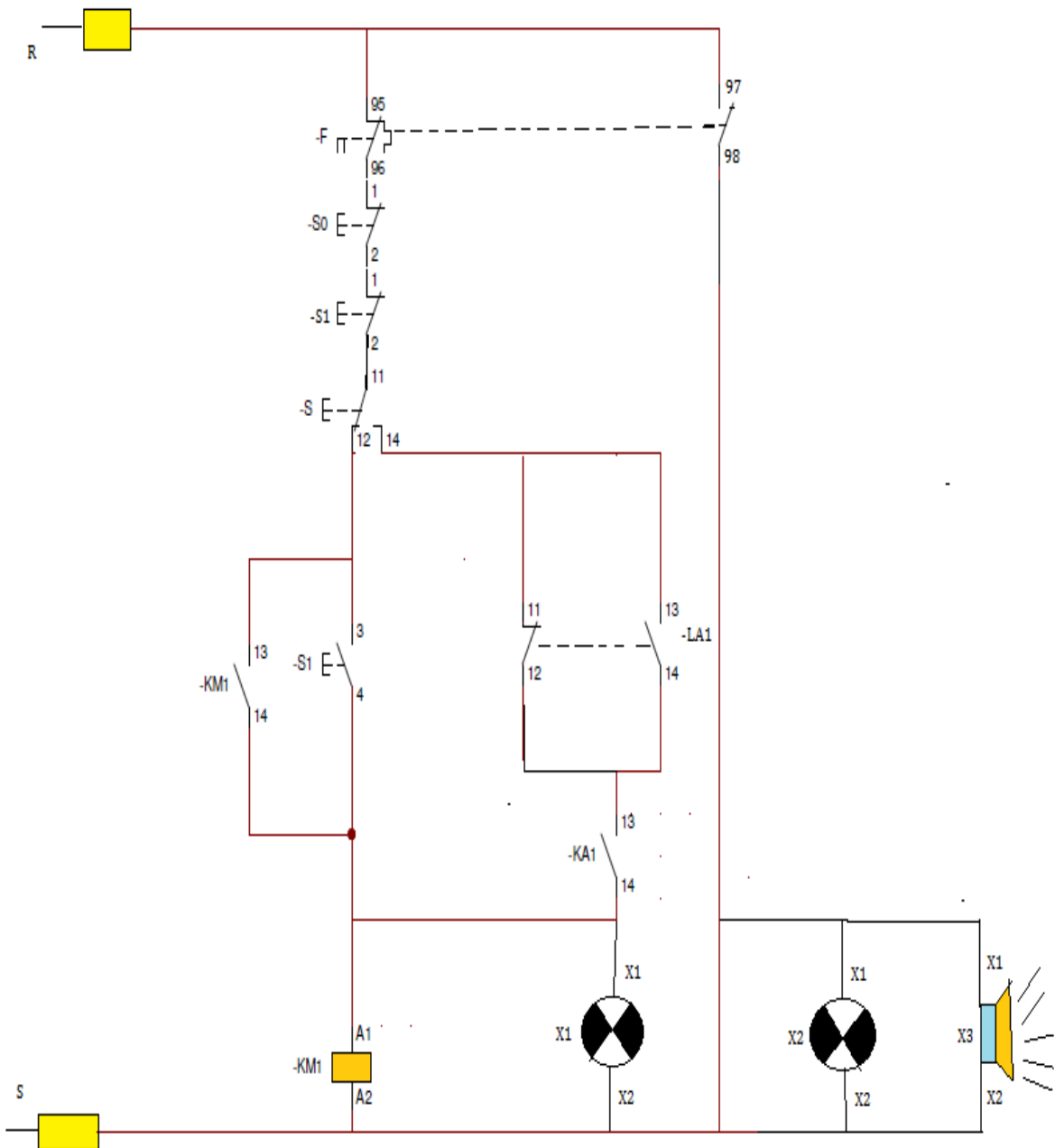
Figura 10. Controlador sd16a SHIMADEN



Fuente: <http://www.intech.co.nz/products/controllers/controllers/sd16a>

- 1.3. **El circuito de control del motor propuesto.** fue realizado teniendo como base el circuito que está actualmente pero se le agrego el paro de emergencia y el botón de apagado, como también la señal sonora para cuando se presente una falla y se muestra en la figura 11.

Figura 11. Circuito de control lógica cableada de la bomba de vacío.



FUENTE: Autores del proyecto

Principio de funcionamiento.

El selector -S es el que hace el cambio de circuito manual – automático con los contactos 11-12-14.

Para el circuito manual se debe poner el selector en posición 11-12, y como funciona al pulsar -S1 se cierra el circuito 1 energizándose la bobina –KM1 y encendiéndose el piloto de marcha H1, por lo cual casi al mismo tiempo se cierra el contacto auxiliar –KM1 de manera que la corriente llega a la bobina por el pulsador y por el contacto auxiliar por los puntos 13-14. Al dejar de pulsar –S1 este vuelve a su posición de reposo, pero la bobina seguirá energizada autosostenida por los puntos 13-14 del contacto auxiliar.

Para desenergizar el circuito se puede hacer dos maneras pulsando –S0 o parada de emergencia y por el pulsador –S1 o pulsador de apagado.

el circuito automático hay que cambiar el selector a los puntos 11- 14 y como funciona, si el controlador SD16A no recibe una señal de corriente del vacuómetro inferior a 9.33 mA (que equivaldría a -33 kPa que es la mínima presión de vacío necesaria para que no se rompa el vacío dentro del sifón) permanecerán los contactos de –LA1 del controlador abiertos y los contactos auxiliares 11-12 permanecerán cerrados energizando los contactos 13-14 de –KA1 que se cierran autososteniéndose y en ese mismo instante se enciende la luz de marcha –X1 y casi al mismo tiempo se energiza la bobina –KM1 dándole marcha al motor.

Ahora como el controlado SD16A es de compuerta por ciclo de histéresis se ha programado para que cierre los contactos analógicos –LA1 cuando el vacuómetro envíe la señal analógica menor de 7.2 mA que equivale a - 66 kPa que es la presión máxima de vacío que fue diseñado el sifón. Entonces en ese instante los contactos 11-12 se abren desenergizando los contactos auxiliares –KA1 y se abren los puntos 13- 14 desenergizándose la bobina –KM1 en ese instante se detiene el motor.

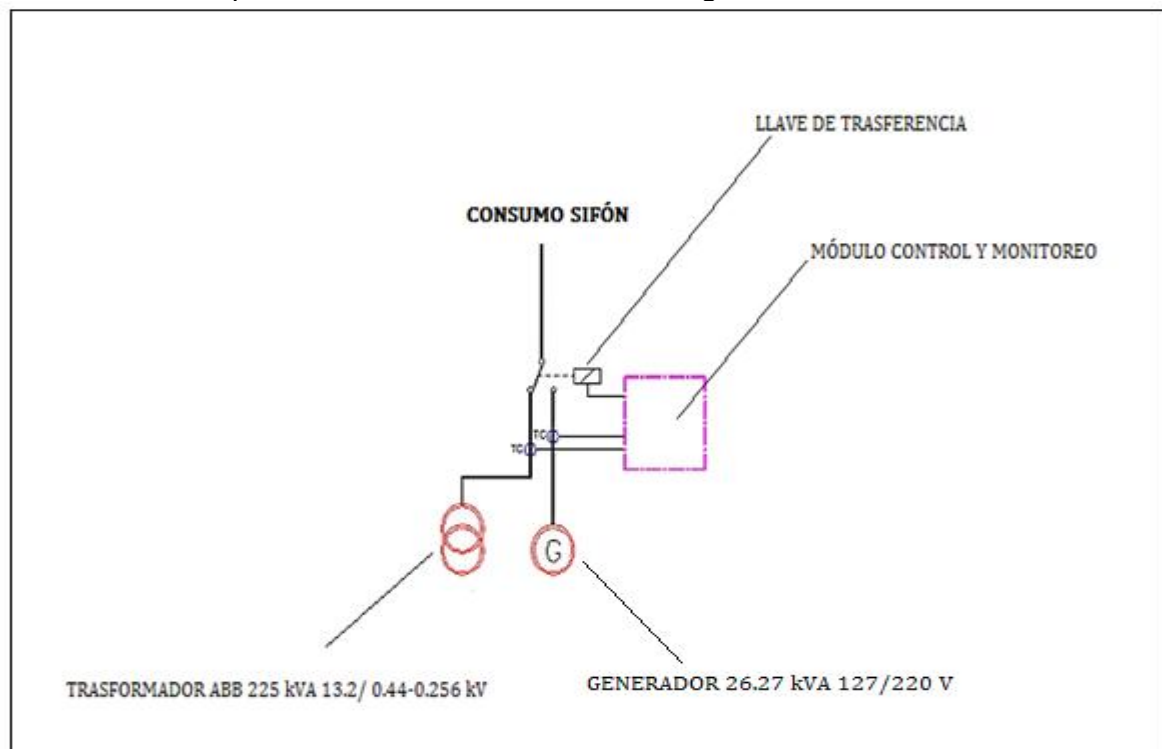
Al apagarse el motor con el tiempo el vacío en la cámara comienza a disminuir y la señal de corriente empieza a aumentar hasta que llega a los 9.33 mA donde se reinicia el ciclo.

Señales de falla cuando ocurre un evento por relé térmico los contactos 95-96 se abren cerrando automáticamente los contactos 97-96 de relé térmico energizándose la luz de falla X2 y en ese mismo instante se energiza el dispositivo sonoro X3.

1.4. Alimentación de la red de energía. COSERVICIOS S.A E.S.P actualmente tiene conexión a la red de energía eléctrica por medio de un transformador trifásico de 225 kVA marca ABB reductor. de 34.5 /0.440-0. 256 kV. Este suministra la energía a la bomba de vacío del sifón y a las bombas auxiliares del canal de captación por gravedad, y en caso de una falla de energía hay una planta auxiliar trifásica de 26.25 kVA accionada por un motor diésel que es exclusiva para el sifón y funciona con un tablero de trasferencia automática (ATS). La figura 12 muestra un esquema de general de conexión.

El módulo de monitoreo está constantemente censando el voltaje de la red de energía y en caso de una falla este módulo ordena el encendido de la planta diésel, pero da un pequeño tiempo a la planta eléctrica para que esté en condiciones de operar y luego, hace la trasferencia de carga al generador por medio de la llave de trasferencia. Cuando vuelve la energía de la red, el modulo ordena la trasferencia de carga a la red de energía eléctrica local y apaga el motor del generador. A este sistema no se le plantea hacer cambios ya que está bien diseñado, es nuevo y le da mucha confianza al sistema sifón.

FIGURA 12. Esquema de conexión transformador-generador.



Fuente: Autores del proyecto

2. FLUJO DE FLUIDOS

Uno de los objetivos de este proyecto, es recopilar información de sistemas similares de captación para tener una mayor comprensión de estos sistemas, pero se realizó una búsqueda por medio de internet y en bibliotecas como en la UPTC y bibliotecas públicas sin arrojar resultados, no se hizo una búsqueda más extendida por falta de recursos económicos del proyecto: entonces se decidió buscar la fundamentación teórica necesaria para afrontar el proyecto y se plasmó en este capítulo.

2.1. HIDRÁULICA. Y CONCEPTOS.

- **Presión.** Se define como la cantidad fuerza ejercida por una unidad de área o a una sustancia. Y se expresa en la siguiente ecuación.

$$P = \frac{F}{A} \quad (4)$$

Dónde:

P: es la presión sobre el elemento

A: Es el área del elemento

F: Es la fuerza aplicada

- **Densidad.** La densidad es la cantidad de masa por unidad de volumen y es denotada con la letra griega ρ (rho) , y se define como:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (5)$$

Dónde:

V es el volumen de la sustancia que tiene la masa, las unidades son en el SI kilogramo por metro cubico

- **Peso específico.** Es la cantidad de peso por unidad de volumen de una sustancia y se denota con la letra griega γ (gama) y se expresa como:

$$\gamma = \frac{w}{V} = \rho g \quad (6)$$

Dónde:

V es el volumen de la sustancia que tiene el peso. Y las unidades son newton sobre metro cubico $\left(\frac{N}{m^3}\right)$ en el SI y libras sobre pie cubico $\left(\frac{lb}{ft^3}\right)$ en el sistema tradicional Estados Unidos.

- **Viscosidad dinámica.** es la resistencia interna al flujo de un fluido, originado por el roce las moléculas que se deslizan unas sobre otras y se representa con la letra griega (η)
- **Presión absoluta y manométrica.** Cuando se hace la medición de presión de un fluido, se realiza con respecto a una presión de referencia que normalmente es la presión atmosférica, se denomina presión manométrica. Si se mide en relación a un vacío perfecto se denomina presión absoluta y relacionan según la ecuación 7.

$$P_{abs} = P_{man} + P_{atm} \quad (7)$$

Donde

$$P_{abs} = \text{presion absoluta}$$

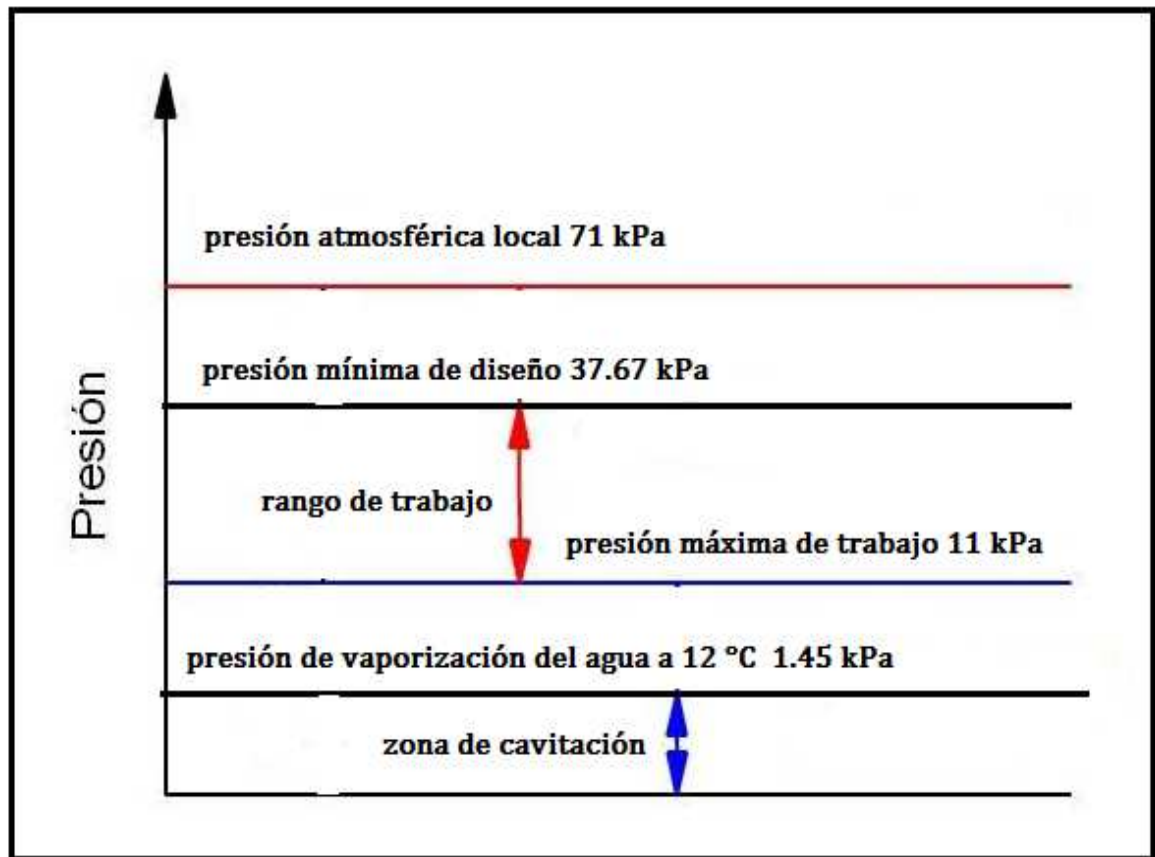
$$P_{man} = \text{presion manometrica}$$

$$P_{atm} = \text{presion atmosferica}$$

- ❖ El vacío perfecto no es posible, por tal razón una presión absoluta siempre será positiva.
- ❖ Una presión manométrica superior a la atmosférica siempre será positiva.
- ❖ Una presión manométrica inferior a la presión atmosférica será negativa y en ocasiones se le llama vacío, en la figura 13 se puede apreciar mejor esos supuestos.

La figura 13 representa el diagrama de presión atmosférica del lago de Tota y también el rango de trabajo de la bomba de vacío y la zona de vaporización del agua del lago a la altura de 3015 msnm y 12 °C de promedio del agua del lago de Tota.

Figura 13. Presión de trabajo del sistema sifón.



Fuente: Autores del proyecto.

- **Ecuación de la energía.** Para el desarrollo de este proyecto se aplicará principalmente la ecuación de la energía que describe el comportamiento de un fluido moviéndose a lo largo de una tubería y depende de tres componentes:
 - Cinética: es la energía debida a la velocidad que posee el fluido.
 - Potencial o gravitacional: es la energía debido a la altitud del fluido.
 - Energía de presión: es la energía que un fluido contiene debido a la presión que posee.

La siguiente ecuación conocida como "ecuación de energía" consta de estos mismos términos.

$$\frac{v^2 \rho}{2} + P + \rho g z = \text{constante} \quad (8)$$

Dónde:

- v =velocidad del fluido en la sección considerada.
- ρ =densidad del fluido.
- P =presión a lo largo de la línea de corriente.
- g =aceleración gravitatoria
- z = altura en la dirección de la gravedad desde una cota de referencia.
- Para aplicar la ecuación se deben realizar los siguientes supuestos:
 - Viscosidad(fricción interna) = 0, Es decir se considera que la línea de corriente sobre la cual se aplica se encuentra en una zona 'no viscosa' del fluido.
 - Caudal constante
 - Flujo incompresible, donde ρ es constante
 - La ecuación se aplica a lo largo de una línea de corriente.

2.2. **La ecuación de energía con fricción y trabajo extremo.** La ecuación de energía es aplicable a fluidos no viscosos, incompresibles, a partir de la conservación de la cantidad de movimiento para fluidos incompresibles se puede expresar de una forma más general que tiene en cuenta fricción y trabajo.

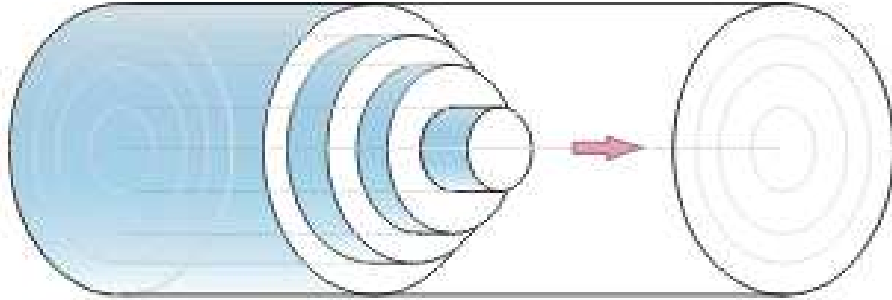
$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 + w = h_f + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 \quad (9)$$

Dónde:

- γ es el peso específico ($\gamma = \rho g$). Este valor se asume constante a través del recorrido al ser un fluido incompresible.
- w trabajo externo que se le suministra (+) o extrae al fluido (-) por unidad de caudal másico a través del recorrido del fluido.
- h_f disipación por fricción a través del recorrido del fluido.
- Los subíndices **1** y **2** indican si los valores están dados para el comienzo o el final del volumen de control respectivamente y $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

- 2.3. **Flujo laminar.** Cuando un fluido viaja por un ducto a una velocidad baja se observa flujo laminar el cual forma círculos concéntricos que viajan en una trayectoria suave y rectilínea como muestra la figura 14.

Figura 14. Representación perfil de flujo laminar



Fuente: http://ricuti.com.ar/no_me_salén/hidrodinamica/FT_laminar.html

- 2.4. **Flujo turbulento y zona de transición.** A medida que la velocidad del flujo aumenta se hace menos suave la trayectoria y forma ondulaciones al observar la sección trasversal del flujo parece oscilar de adentro hacia afuera. Esta es la denominada zona de transición. Al incrementar la velocidad se forman más ondulaciones y el flujo se hace turbulento (ver figura 15.).

Figura 15. Representación flujo turbulento



Fuente: <http://www.gphysics.net/pages/druyd-content.php>

2.5. **Numero De Reynolds.** El comportamiento de un fluido tiene que ver mucho con las pérdidas ya que un flujo turbulento tiene mayores pérdidas de energía que un flujo laminar, lo que se hace necesario predecir su comportamiento ya que la mayoría de las tuberías son opacas y no se puede observar su comportamiento el cual depende de cuatro variables.

- La densidad del fluido (ρ)
- Su viscosidad (η)
- Diámetro interno del ducto (D)
- Velocidad promedio del fluido (v)

NR Es la relación que existe entre la fuerza de inercia sobre un elemento de fluido y la fuerza viscosa.

$$NR = \frac{vD\rho}{\eta} \quad (10)$$

Dónde:

NR: Numero de Reynolds

v : Velocidad promedio del fluido

D: Diámetro interior del ducto

ρ : Densidad del fluido

η : Viscosidad dinámica.

Osborne Reynolds demostró que es posible predecir el comportamiento de un fluido ya sea flujo laminar o turbulento con el (NR). Y estableció que:

Si: $NR < 2000$ el flujo es laminar.

Si: $NR > 4000$ el flujo es turbulento.

Si: NR está entre 2000 y 4000 está en la zona de transición y su comportamiento no es posible de predecir.

2.6. PERDIDAS DE ENERGÍA EN EL SISTEMA

2.6.1. **Ecuación de Darcy.** Estableció que la fricción es proporcional a la carga de velocidad del fluido y a la relación entre el diámetro de la tubería y su longitud y se expresada como la ecuación (11).

$$h_l = f * \frac{l}{D} * \frac{v^2}{2g} \quad (11)$$

Dónde:

h_l : pérdida energía debido a la fricción.

f : es el factor de fricción

l : longitud de la corriente del flujo

D : diamtro interior de la tubería.

v : velocidad promedio del flujo

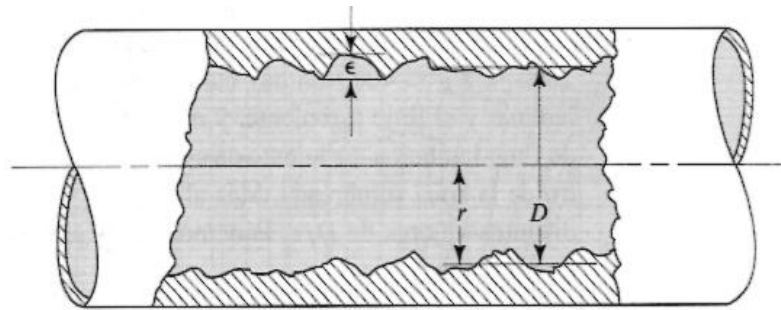
La ecuación de Darcy es ideal para hallar las pérdidas por fricción en ductos rectilíneos tanto para flujo laminar o turbulento.

2.6.2. **Factor de fricción.** Es un parámetro adimensional que se utiliza para calcular la perdida de carga en una tubería debido a la fricción. Uno de los métodos más usados para hallar el factor de fricción es el diagrama de Moody (ver anexo b), pero se han establecido ecuaciones para calcularlo matemáticamente como para flujo laminar y turbulento. Para hallar el factor de fricción de flujo laminar se usa la siguiente ecuación :

$$f = \frac{64}{NR} \quad (12)$$

2.6.3. **Factor de fricción para flujo turbulento.** Cuando el flujo es turbulento el factor de fricción depende de dos cantidades adimensionales como lo es el número de Reynolds NR y la rugosidad relativa de la tubería (ϵ) como se muestra en la figura 16 y los valores más comunes están en la tabla 1.

Figura 16. Esquema rugosidad relativa



Fuente: Mecánica de fluidos Robert L Mott, sexta edición

Tabla 1. Valores de la rugosidad relativa para tubos de diferentes materiales.

Material	Rugosidad ϵ (m)	Rugosidad ϵ (pie)
Vidrio	Liso	Liso
Plástico	3.0×10^{-7}	1.0×10^{-6}
Tubo extruido; cobre, latón y acero	1.5×10^{-6}	5.0×10^{-6}
Acero, comercial o soldado	4.6×10^{-5}	1.5×10^{-4}
Hierro galvanizado	1.5×10^{-4}	5.0×10^{-4}
Hierro dúctil, recubierto	1.2×10^{-4}	4.0×10^{-4}
Hierro dúctil, no recubierto	2.4×10^{-4}	8.0×10^{-4}
Concreto, bien fabricado	1.2×10^{-4}	4.0×10^{-4}
Acero remachado	1.8×10^{-3}	6.0×10^{-3}

Fuente: Mecánica de fluidos Robert L Mott, sexta edición

El método más utilizado para hallar el factor de fricción es el diagrama de Moody. Pero también es posible hallar el factor de fricción matemáticamente mediante la ecuación de factor de fricción para flujo turbulento presentada por P. K. Swamce y A. K. Jain la cual se muestra a continuación.

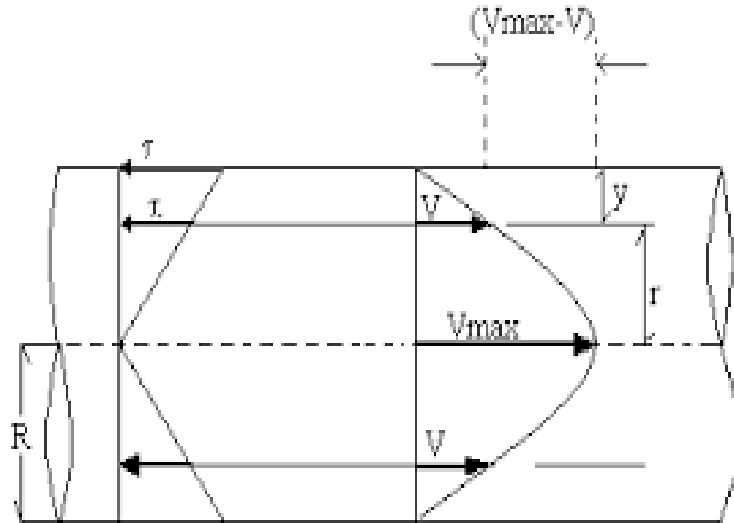
$$f = \frac{.25}{\left[\log \left(\frac{1}{3.7 \left(\frac{D}{\epsilon} \right)} + \frac{5.74}{NR^{.9}} \right) \right]^2} \quad (13)$$

Esta ecuación se utilizará para realizar los cálculos del factor de fricción para el proyecto.

- 2.6.4. **Perfil de velocidad.** La velocidad de un flujo cambia en diferentes partes de la sección de la tubería ya que cuando más cerca se está de la pared del tubo menor será la velocidad del fluido y tiende a tomar la velocidad estacionaria de la pared del ducto y de lo contrario se incrementará hasta que sea máxima la velocidad en la línea central de la tubería.

- 2.6.5. **Perfil de velocidad para flujo laminar.** Cuando se observa flujo laminar en un tubo circular se ve una serie de anillos concéntricos que se deslizan uno sobre el otro, el cual da como resultado un flujo suave y rectilíneo y tiene la mayor velocidad en la línea central de la tubería. como se muestra en la figura 17.

Figura 17. Perfil de velocidad para flujo laminar



Fuente: Mecánica de fluidos Robert L Mott, sexta edición

La ecuación que representa el perfil de velocidad para flujo laminar en un ducto circular es:

$$U = 2v \left[1 - (r/r_0)^2 \right] \quad (14)$$

Dónde:

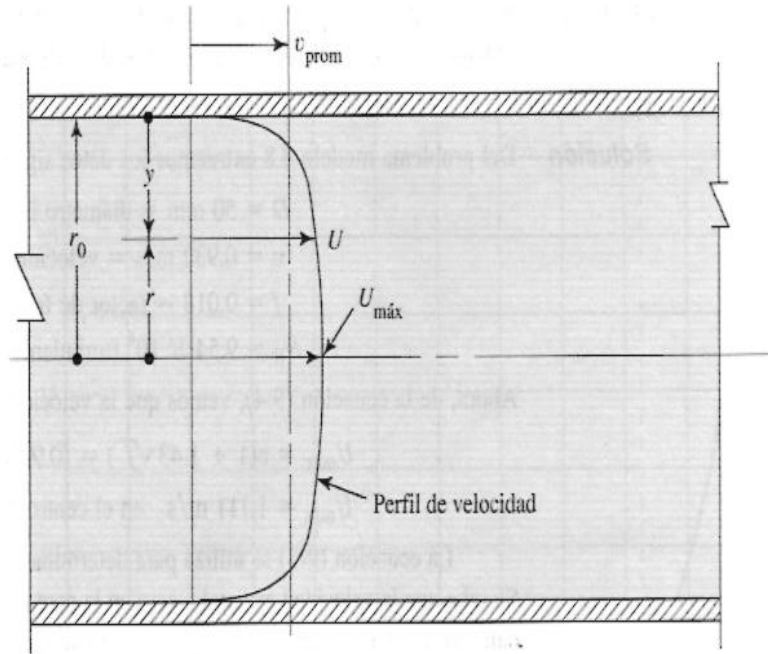
U = velocidad local del flujo en un radio r

v = velocidad promedio del fluido

r_0 = radio máximo

- 2.6.6. **Perfil de velocidad para flujo turbulento.** Al observar el comportamiento de un flujo turbulento, la velocidad cambia rápidamente de cero en la pared del ducto y parece ser más uniforme en toda la distribución de la sección transversal de la tubería, pero está directamente relacionado con el factor de fricción y cambia con el número de Reynolds y la rugosidad relativa de la tubería(ver figura 18)

Figura 18. Perfil de velocidad para flujo turbulento



Fuente: Mecánica de fluidos Robert L Mott, sexta edición

➤ Ecuaciones para flujo turbulento:

$$U = v[1 + 1.43\sqrt{f} + 2.15\sqrt{f}\log_{10}(1 - r/r_0)] \quad (15)$$

Tomando las distancias de la pared del tubo $y = r_0 - r$ Entonces:

$$1 - \frac{r}{r_0} = \frac{r_0 - r}{r_0} = \frac{y}{r_0} \quad (16)$$

Reemplazando

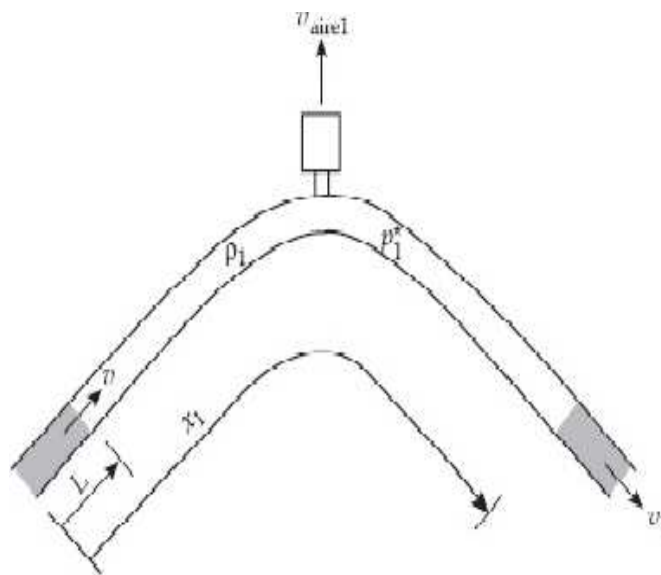
$$U = v[1 + 1.43\sqrt{f} + 2.15\log_{10}(1 - y/r_0)] \quad (17)$$

En el centro de la tubería como el logaritmo de cero no está definido, y es posible que r tiende a r_0 pero no sea igual y solo puede tender a cero entonces:

$$U_{max} = v(1 + 1.43\sqrt{f}) \quad (18)$$

- 2.7. **Aire en la tubería.** Cuando una burbuja de aire entra por la pipa del sifón esta comienza a ascender por la tubería hasta la cumbre del sifón y luego empieza el descenso formando una cavidad o bolsón de aire llamado soquete, que es un constreñimiento del flujo lo que genera una pérdida en la carga de presión, que es equivalente a la cuota de comienzo y final del soquete, pero a medida que la burbuja baja de la cumbre del sifón la presión comienza a incrementar y la burbuja disminuye su tamaño y puede ocurrir dos escenarios: que se quede en parte interior superior de la tubería formando un soquete, o siga aguas abajo y depende del caudal crítico del sistema. la figura 19 muestra un caso similar.

Figura 19. Formación de un soquete por la entrada de aire en un sistema.



Fuente: <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v2n1/v2n1a3.pdf>

- 2.7.1. **Caudal crítico.** Los investigadores de hidráulica han logrado estimar un gasto que se llama caudal crítico (Q_c) que solo depende del diámetro interior de la tubería. Para entender más sobre (Q_c), cuando el sistema entrega un caudal inferior a (Q_c) el soquete permanecerá en su lugar y la pérdida de presión dependerá del aire que haya logrado entrar al sistema y la pérdida de presión será igual a la suma de las alturas del soquete. Si esto sucede significa que las pérdidas combinadas del sistema por roce hagan que $Q = Q_c$ y la presión en el soquete supere la presión disponible del sistema

2.7.2. Ecuaciones para determinar el caudal crítico. El caudal crítico solo depende del diámetro interior de la tubería donde está presente el soquete y se da en los puntos altos cuando

$$Q_c = 0.38D^{5/2}g^{1/2} \quad (19)$$

Pero los soquetes estacionarios no serán llevados aguas debajo de la cumbre hasta que el caudal Q valga Q_s (caudal supercrítico)

$$Q_s = 0.50D^{5/2}g^{1/2} \quad (20)$$

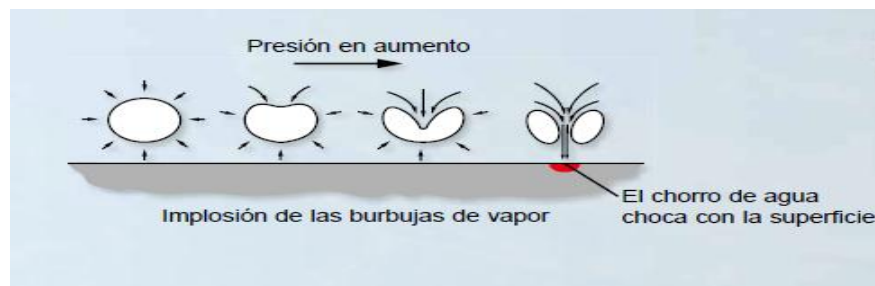
Si el caudal está en metros cúbicos por segundo las ecuaciones se simplifican de esta manera.

$$Q_c = 1.19D^{5/2} \quad (21)$$

$$Q_s = 1.57D^{5/2} \quad (22)$$

2.7.3. Cavitación o aspiración en vacío. cuando una burbuja de aire entra al sifón o bolsas de gases producidos por el agua y luego en el interior de la tubería estos gases se expanden dentro de la tubería debido a las presiones bajas, las burbujas viajan por el sifón hasta zonas de mayor presión donde comienzan a ser aplastadas por la presión cada vez más hasta que la burbuja implosiona generando un chorro de agua a una velocidad considerable y en ocasiones el chorro de agua se estrella con la pared interna del ducto y arranca parte de material de la tubería. Este fenómeno está acompañado de ruido y vibraciones que dan la impresión como si viajara grava dentro del tubo golpeando en diferentes partes. (ver figura 20).

Figura 20. Implosión de una burbuja



Fuente: Tecnología alto vacío herramienta básica para el desarrollo industrial, primera edición

- **Porque se debe evitar la cavitación.** Porque crea discontinuidad en el flujo, lo cual disminuye la eficiencia de conducción del sistema. Crea inestabilidad del sistema lo que puede generar ruido, vibraciones. Y la implosión de las burbujas produce tensiones muy fuertes que pueden ocasionar el colapso y la falla del sistema.

La presencia de la cavitación se puede identificar mediante un numero adimensional llamado parámetro de cavitación.

$$\sigma = \frac{P - P_v}{\rho \frac{v^2}{2}} \quad (23)$$

Dónde:

P: es la presión absoluta en el punto evaluado

v: es la velocidad promedio del fluido

P_v: es presión de vaporización del agua

ρ: es la densidad del agua

La presión de vaporización del agua a 12 °C es de 1.45 kPa.

2.8. VACÍO

2.8.1. **Vacío.** es un espacio lleno de gases con presiones menores a la presión atmosférica, el vacío se presenta principalmente a unos kilómetros sobre la superficie terrestre, pero para el desarrollo este proyecto nos interesa el vacío que se puede obtener artificialmente al extraer el gas de una cámara por medio de bombas mecánicas.

2.8.2. **Clasificación del vacío.** Hay diferentes clasificaciones según el grado de vacío:

- **Bajo y, mediano vacío:** intervalo de presión que extiende desde cerca a los 10^{-3} mmHg hasta 10^{-7} mmHg .
- **Ultra alto vacío:** se extiende para presiones desde 10^{-7} mmHg hasta los 10^{-16} mmHg

2.8.3. **Fugas, degasificación y retroflujo.** Cuando se quiere construir un sistema de vacío es importante asegurarse de lograr un sellado hermético en la cámara y las tuberías que limitan el vacío, porque una fuga o fisura en los componentes del sistema permitirá la entrada de aire de la atmósfera al sistema de vacío lo que es

altamente perjudicial. A este fenómeno de llama fugas o pérdidas. Pero aun cuando un sistema esté perfectamente sellado, es imposible lograr el vacío perfecto debido a dos fenómenos que son la desgasificación y el retroflujo.

La desgasificación es un fenómeno de emanación de gases por parte de las superficies de los materiales del sistema cuyos gases pueden ser vapor de agua, oxígeno u otros gases adheridos al interior de los materiales del sistema de vacío. También pueden liberarse átomos de la superficie de los materiales a esa presión y temperatura causada por el vacío.

Normalmente el flujo de un gas es del interior de la cámara y através de la bomba hacia la atmosfera, pero hay partículas que se portan individualmente y se mueven en sentido opuesto al flujo como el retroflujo y es altamente nocivo en sistema de vacío debido a que hay elementos indeseables como el aceite ya que este viaja de la bomba hacia el interior de la cámara.¹

2.8.4. CALCULO DE LA BOMBA DE VACÍO

En la selección de la bomba de vacío, se tuvieron en cuenta las variables que se numeran a continuación:

La compresibilidad del aire (o su capacidad para expandirse y llenar totalmente la cámara de vacío) debido a que el flujo de masa no es constante contrario al flujo volumétrico.

Para ello, se hizo uso de un modelo matemático mediante la ecuación diferencial que describe la cantidad de masa de aire en la cámara, la cual permitió determinar el tiempo de extracción necesario para alcanzar la presión o nivel de vacío requeridos en el proceso.

$$\frac{dm}{dt} = -Q * \rho = -q * \frac{m}{v} \quad (24)$$

Esta es una ecuación diferencial de varias variables separables cuya solución es:

$$\int_{m1}^{m2} \frac{dm}{m} = \int_{t=0}^{t=t} -\frac{Q}{V} * dt \quad (25)$$

$$\ln(mf) - \ln(mi) = -\frac{Q * t}{V} \rightarrow t = \frac{V}{Q} * \ln\left(\frac{mi}{mf}\right) \quad (26)$$

¹ ARTURO TALLEDO. Tecnología de alto vacío. Lima Perú octubre 2013. p 14.

Suponiendo que el gas cumple con la ley de los gases ideales se tiene que:

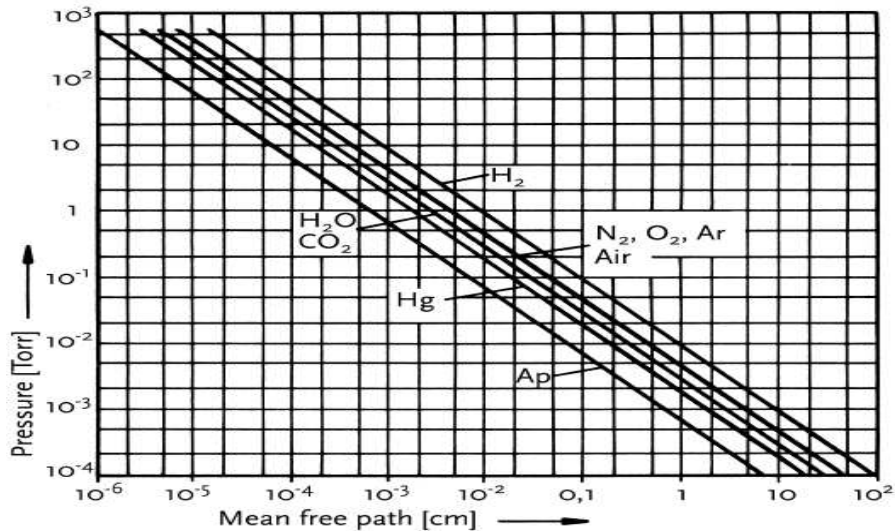
$$m = \frac{P * V}{R * T} \rightarrow \frac{m_1}{m_2} = \frac{P_1 * V}{R * T_1} * \frac{R * T_2}{P_2 * V} = \frac{P_1 * T_2}{P_2 * T_1} \quad (27)$$

Si se aproxima este proceso como un proceso isotérmico, se tiene que:

$$t = \frac{V}{s_{eff}} * \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \quad (28)$$

2.8.5. **Trayectoria libre media (\bar{l}).** Es la longitud en promedio que recorre una molécula entre dos choques sucesivos y la gráfica contrasta la trayectoria media libre a varias presiones para diferentes gases.

Grafica 1. Presión contra trayectoria media libre.



Fuente: BANNWARTH, Helmut. Liquid Ring Vacuum Pumps. Alemania. WILEY-VCH 2005

2.8.6. **Flujo estacionario.** Cuando un sistema de vacío comienza a funcionar el flujo neto de moléculas a través de una sección trasversal varía con el tiempo. Pero después de un determinado tiempo el flujo neto de moléculas sobre cualquier sección trasversal permanece constante en el tiempo y se dice que se alcanzó un régimen estacionario.

Para diferenciar entre los diferentes regímenes se usa el número de Knudsen K_n , que se define como la razón del diámetro de la cámara o tubería, a la trayectoria libre media,

Número de knudsen

$$K_n = \frac{\bar{l}}{D_t} \quad (29)$$

Según el resultado del número de Knudsen se puede identificar el régimen comparando el número de Knudsen en la tabla 2.

Tabla 2. Numero de Knudsen

Régimen	Numero de knudsen
Flujo molecular	$K_n > 0.5$
Flujo intermedio	$0.5 > K_n > 0.01$
Flujo viscoso	$K_n < 0.01$

Fuente: BANNWARTH, Helmut. Liquid Ring Vacuum Pumps. Alemania. WILEY-VCH 2005

2.8.7. Conductancia. Se le denomina al volumen de gas que se puede fluir en una conducción, por la diferencia de presiones en sus extremos. La figura 21 muestra una conexión bomba cámara de vacío.

$$c = \frac{1}{w} \quad (30)$$

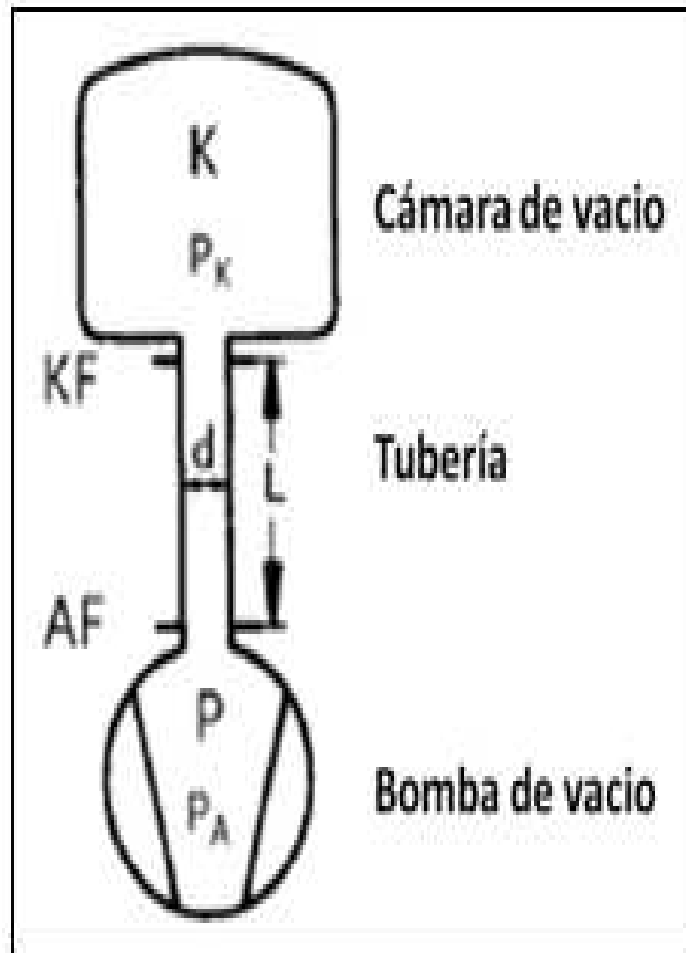
Conductividad en serie

$$\frac{1}{C_{SIS}} = \frac{1}{\frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} + \frac{1}{c_3}} \quad (31)$$

➤ cuando se asocian en paralelo es

$$C_{sis} = C_1 + C_2 + \dots (32)$$

Figura 21. Esquema simplificado estación de vacío



Fuente: BANNWARTH, Helmut. Liquid Ring Vacuum Pumps. Alemania. WILEY-VCH 2005.

2.8.8. Resistividad: es el volumen de gas que se deja de fluir en un ducto por la diferencia de presiones en sus extremos.

Ecuaciones:

$$w_{laminar} = \frac{a}{182 * d^4 * \bar{p}} \quad (33)$$

Donde:

$w_{laminar}$: resististividad [$\frac{S}{l}$]

a = longitud de la tubería [cm]

\bar{p} = presión media [torr]

$$w_{molecular} = \frac{a}{12.1 * d^3} \quad (34)$$

Donde:

$w_{laminar}$: resististividad [$\frac{S}{l}$]

a = longitud de la tubería [cm]

2.8.9. **Velocidad de bombeo.** Es definida como el volumen de gas por unidad de tiempo que pasa a través del plano de la abertura de entrada de la bomba, es decir, el caudal en la abertura de entrada de una bomba de vacío.

$$S_b = \frac{Q}{P_b} \quad (35)$$

2.8.10. **Velocidad de bombeo efectiva.** es el volumen de gas por unidad de tiempo que es capaz de extraer la bomba debido al efecto de la tubería y los accesorios.

$$S_{eff} = \frac{C * S_b}{C + S_b} \quad (36)$$

Dónde:

C: Conductancia

S_b : Velocidad de bombeo en la brida de la bomba.

S_{eff} : Capacidad de bombeo efectiva en la entrada de la bomba

- Tiempo de bombeo en una cámara sin fuga y desgasificación. Es el tiempo que tarda la bomba de extraer los gases de un sistema para ir de una presión a otra

$$t = \frac{V}{S_{eff}} \ln \frac{P_i}{P_f} \quad (37)$$

Dónde:

V : volumen de la cámara.

P_i : Presión inicial

P_f : Presión final

S_{eff} : Capacidad de bombeo efectiva de la bomba.

3. EVALUACION DEL SIFÓN

El objetivo de los cálculos es encontrar las variables como presión velocidad del fluido para tomar poder realizar el estudio de optimización del sifón

3.1. CÁLCULOS HIDRÁULICOS

Para los cálculos hidráulicos se tomó como base el caudal proporcionado por COSERVICIOS S.A. E.S.P. el cual es de $Q = 0.747 \frac{m^3}{s}$ y el diámetro interno de tubería de 0.91 m, el nivel de referencia para hacer los cálculos es el nivel del lago y se muestra en la figura 22. También se hizo los cálculos con el nivel más bajo del lago presentado en el periodo de tiempo del año 2005 y el 2015, igualmente la temperatura del agua del lago es de 12 °C.

El objetivo de los cálculos es obtener información de la presión en diferentes puntos del sifón teniendo en cuenta que se conoce el caudal actual del sifón por los macro medidores del sistema y estos resultados de presión obtenidos se comparan con las mediciones de presión que arroja el vacuómetro que está en la cresta del sifón y el manómetro que hay en la válvula de 700 mm, para hacer una comparación y ver si hay una brecha lo suficientemente grande se podrá concluir que hay fugas o grandes pérdidas por fricción o taponamientos por formación de soquetes.

Condiciones iniciales:

$$D = 0.91m$$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} A = \frac{\pi (0.91m)^2}{4} = 0.650m^2$$

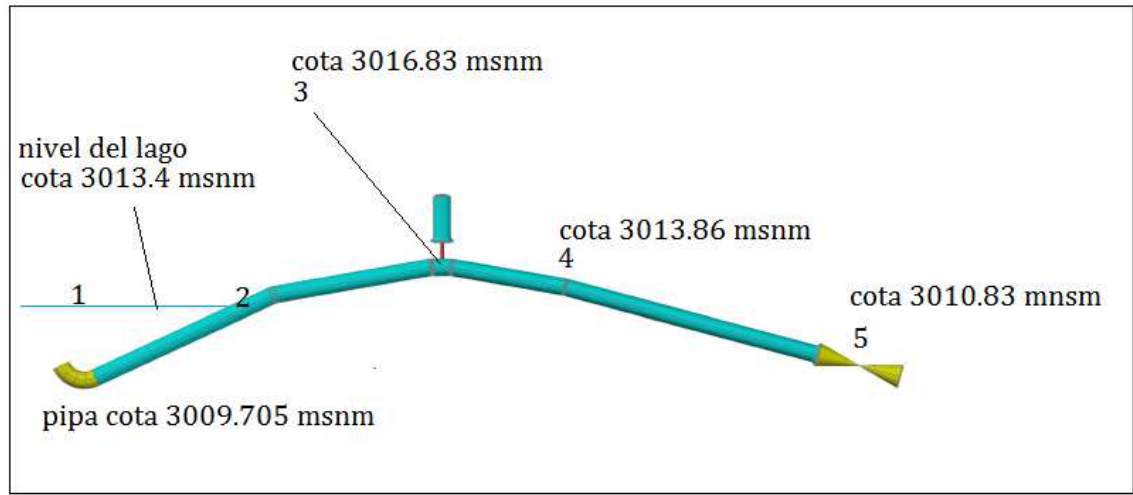
Caudal del tubo sifón

$$Q = 0.7472 \frac{m^3}{s}$$

$$Q = vA$$

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{0.7472 \frac{m^3}{s}}{0.650m^2} = 1.149 \frac{m}{s}$$

Figura 22. Esquema tubo sifon de Tota



Fuente: Autores del proyecto

- Aplicando la ecuación de energía en los *puntos 1 y 2*

Teniendo en cuenta que 1 es la superficie del lago y en ese punto la presión es cero y puesto que el área del lago es supremamente grande se asume que la velocidad en la superficie del lago es igual a cero, y los puntos 1 y 2 están a la misma altura.

$$p_1 = 0, v_1 = 0$$

$$\gamma_{agua} = 9.8016 \text{ kN/m}^3 \text{ a } 12^\circ \text{ Anexo F}$$

$$z_1 = z_2$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{v_2^2}{2g}$$

Despejando y reemplazando se obtiene.

$$P_2 = -\frac{v_2^2 \gamma}{2g}$$

$$P_2 = -\frac{(1.149 \text{ m/s})^2 9.81 \text{ kN/m}^3}{2 * 9.81 \text{ m/s}^2}$$

$$p_2 = -0.5745 \text{ kPa}$$

- Aplicando ecuación de energía en el tramo de 2 a 3

Ya que la sección circular interna del tubo permanece constante la velocidad de 2 y de 3 es la misma, el punto 2 está a 3013.4 msnm y el punto 3 a 3016.8 msnm, al reemplazar y despejar en la ecuación de energía se puede calcular la presión en el punto 3.

$$v_1 = v_2$$

$$p_2 = -0.5745 \text{ kPa}$$

$$z_2 = 3013.4 \text{ msnm}$$

$$z_3 = 3016.8 \text{ msnm}$$

Ecuación de Bernoulli

$$\frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{v_2^2}{2g} = \frac{P_3}{\gamma} + Z_3 + \frac{v_3^2}{2g}$$

Reemplazando y despejando se obtiene:

$$p_3 = \left[\frac{p_2}{\gamma} + (z_2 - z_3) \right] \gamma$$

$$P_3 = \left[\frac{-0.5745 \text{ kPa}}{9.8016 \text{ kN/m}^3} + (3014.86 \text{ m} - 3016.8 \text{ m}) \right] 9.8016 \text{ kN/m}^3 = -33.928 \text{ kPa}$$

Se calculó en diferentes puntos y la tabla 3 muestra la presión en el tramo 2 y 3

Tabla 3. Cálculos de presión del tramo 2 a 3 del sifón

Tramo de 2 a 3		
msnm	v(m/s)	P(kPa)
3013,4	1,149	-0,5745
3013,6	1,149	-2,5365
3013,8	1,149	-4,4985
3014	1,149	-6,4605
3014,2	1,149	-8,4225
3014,4	1,149	-10,3845
3014,6	1,149	-12,3465
3014,8	1,149	-14,3085
3015	1,149	-16,2705
3015,2	1,149	-18,2325
3015,4	1,149	-20,1945
3015,6	1,149	-22,1565
3015,8	1,149	-24,1185
3016	1,149	-26,0805
3016,2	1,149	-28,0425
3016,4	1,149	-30,0045
3016,6	1,149	-31,9665
3016,8	1,149	-33,9285

Fuente: Autores del proyecto

➤ Ecuación de energía tramo 3 a 4

Teniendo:

$$v_3 = v_4$$

$$p_3 = -33.928kPa$$

$$z_3 = 3016.8msnm$$

$$z_4 = 3013.8msnm$$

Aplicando ecuación de energía entre 3 y 4

$$\frac{P_3}{\gamma} + Z_3 = \frac{P_4}{\gamma} + Z_4$$

Despejando P_4

$$P_4 = \left[\frac{P_3}{\gamma} + z_3 - z_4 \right] \gamma$$

$$P_4 = \left[\frac{-33.92 \text{ kPa}}{9.8016 \text{ kN/m}^3} + 3016.8 \text{ m} - 3013.8 \text{ m} \right] 9.8016 \text{ kN/m}^3$$

$$P_4 = -4.49 \text{ kPa}$$

Se calculó en diferentes puntos y la tabla 4 muestra la presión entre el tramo 3 y 4.

Tabla 4. Calculo presión tramo 3 a 4 del sifón

Tramo de 3 a 4		
Msnm	v(m/s)	P(kPa)
3016,8	1,149	-33,9285
3016,6	1,149	-31,9665
3016,4	1,149	-30,0045
3016,2	1,149	-28,0425
3016	1,149	-26,0805
3015,8	1,149	-24,1185
3015,6	1,149	-22,1565
3015,4	1,149	-20,1945
3015,2	1,149	-18,2325
3015	1,149	-16,2705
3014,8	1,149	-14,3085
3014,6	1,149	-12,3465
3014,4	1,149	-10,3845
3014,2	1,149	-8,4225
3014	1,149	-6,4605
3013,8	1,149	-4,4985

Fuente: Autores del proyecto

➤ Tramo 4 a 5

Teniendo

$$v_4 = v_5$$

$$p_4 = -4.49 kPa$$

$$z_4 = 3013.8 \text{ msnm}$$

$$z_5 = 3010.8 \text{ msnm}$$

Aplicando ecuación de energía entre 4 y 5

$$\frac{P_4}{\gamma} + Z_4 = \frac{P_5}{\gamma} + Z_5$$

Despejando p_5

$$p_5 = \left[\frac{p_4}{\gamma} + z_4 - z_5 \right] \gamma$$

$$p_4 = \left[\frac{-4.49 kPa}{9.8016 \text{ kN/m}^3} + 3013.8_m - 3010.8_m \right] 9.8016 \text{ kN/m}^3$$

$$p_4 = 24.93 kPa$$

Se realizó los cálculos para presión a diferentes puntos en el tramo 4 a 5 y se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Valores de presión del tramo 4 y 5 del sifón

Tramo de 4 a 5		
msnm	v(m/s)	P(kPa)
3013,8	1,149	-4,4985
3013,6	1,149	-2,5365
3013,4	1,149	-0,5745
3013,2	1,149	1,3875
3013	1,149	3,3495
3012,8	1,149	5,3115
3012,6	1,149	7,2735
3012,4	1,149	9,2355
3012,2	1,149	11,1975
3012	1,149	13,1595
3011,8	1,149	15,1215
3011,6	1,149	17,0835
3011,4	1,149	19,0455
3011,2	1,149	21,0075
3011	1,149	22,9695
3010,8	1,149	24,9315

Fuente: Autores del proyecto

3.2. CALCULO DE ENTREGA LIBRE

Los cálculos anteriores se hicieron teniendo en cuenta el caudal proporcionado por COSERVICIOS S.A.E.S.P. pero ahora se hace el cálculo asumiendo que la entrega del sifón es libre, y porque se hace este cálculo para comparar si las válvulas de entrega afectan el desempeño del sistema. Los niveles de referencia serán los mismos de la figura 22. (Ver página 46).

- Condiciones iniciales

La presión en el punto 1 se asumirá cero ya que se maneja presión manométrica y la velocidad en 1 se asumirá como cero. El nivel de referencia se asume el nivel del lago. Como la entrega será libre la presión en 5 también será cero entonces:

Ecuación de energía entre 1 y 5.

$$p_1 = 0$$

$$v_1 = 0$$

$$p_5 = 0$$

$$D = 0.91m$$

$$\gamma = 9.81 \text{ kN} / m^3$$

$$z_5 = 3010.83 \text{ msnm}$$

$$z_1 = 3013.51 \text{ msnm}$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

Ecuación de energía

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_5}{\gamma} + Z_5 + \frac{v_5^2}{2g}$$

Reemplazando y despejando se puede calcular la velocidad en 6

$$z_1 = Z_5 + \frac{v_5^2}{2g}$$

$$z_1 - Z_5 = \frac{v_5^2}{2g}$$

$$v_5 = \sqrt{z_1 - z_5 * 2g}$$

$$v_5 = \sqrt{(3013.51 - 3010.83) * 2 * 9.81 \text{ m/s}^2}$$

$$v_5 = \sqrt{52.5816 \text{ m}^2/\text{s}^2} = 7.251 \text{ m/s}$$

- La ecuación $v_5 = \sqrt{(z_1 - z_5) * 2g}$ es interesante ya que de esta se puede deducir que mientras z_1 se mayor z_5 se presentará circulación es decir mientras haya agua hasta el nivel de la pipa habrá circulación. Por otro lado es evidente que si se hace una entrega libre del sifón la velocidad del fluido es mucho mayor y también el caudal del sifón sería ampliamente superior que el caudal crítico, lo que evita una serie de inconvenientes con las burbujas de aire. Pero esta entrega se tendría que hacer teniendo en cuenta que la conexión entre el canal de captación y tubo sifón es importante, ya que para hacer una carga desde cero del sifón es mucho más fácil si se permite paso de agua entre canal de captación y el sifón.

3.3. Numero de Reynolds para el flujo del sifón de tota

Parámetros del sifón

$$t = 12^{\circ}\text{C}$$

$$v = 1.147 \text{ m/s}$$

$$D = 0.91 \text{ m}$$

$$\rho_{a \ 12^{\circ}\text{C}} = 1000 \text{ kg/m}^3 \text{ ANEXO F}$$

$$\eta_{a \ 12^{\circ}\text{C}} = 0.00124 \text{ Pa ANEXO F}$$

$$NR = \frac{VD\rho}{\eta} = \frac{VD}{\nu}$$

$$NR = \frac{1.147 \text{ m/s} * 0.91 \text{ m} * 1000 \text{ kg/m}^3}{0.00124 \text{ kg/m}^2} = 841750 \text{ Flujo turbulento}$$

3.4. Calculo del factor de fricción del tubo del sifón se calculó con la ecuación 13.

Parámetros:

$$NR = 841750$$

$$D = 0.91 \text{ cm}$$

$\epsilon: 2.410^{-4} \text{ m}$ *hierro ductil no recubierto. Tabla 1 valor de diseño.*

$$f = \frac{.25}{\left[\log \left(\frac{1}{3.7 \left(\frac{0.91 \text{ m}}{2.4 * 10^{-4} \text{ m}} \right)} + \frac{5.74}{841750^{.9}} \right) \right]^2} = 0.0145$$

3.5. Pérdidas del sifón de tota por fricción. Se hallan mediante la ecuación de Darcy.

➤ Ecuación de Darcy

$$h_l = f * \frac{l}{d} * \frac{v^2}{2g}$$

Pérdidas por fricción tramo 1 y 2. Parámetros:

$$v = 1.114$$

$$D = 0.91m$$

$$l = 125m$$

$$h_{l_1} = 0.0145 * \frac{125m}{0.91m} * \frac{(1.114 \frac{m}{s})^2}{2 * 9.81 \frac{m}{s^2}} = 0.126m$$

tramo 2 a 3

$$v = 1.114 \frac{m}{s}$$

$$D = 0.91m$$

$$l = 89.29m$$

$$h_{l_2} = 0.0145 * \frac{89.29m}{0.91m} * \frac{(1.114 \frac{m}{s})^2}{2 * 9.81 \frac{m}{s^2}} = 0.0899 m$$

tramo 3 a 4

$$v = 1.114 \frac{m}{s}$$

$$D = 0.91m$$

$$l = 50.53m$$

$$h_{l_3} = 0.0145 * \frac{50.53 m}{0.91 m} * \frac{(1.114 \frac{m}{s})^2}{2 * 9.81 \frac{m}{s^2}} = 0.0509 m$$

tramo 4 a 5

$$v = 1.114 \text{ m/s}$$

$$D = 0.91 \text{ m}$$

$$l = 367.8 \text{ m}$$

$$h_{l_4} = 0.0145 * \frac{367.8 \text{ m}}{0.91 \text{ m}} * \frac{(1.114 \text{ m/s})^2}{2 * 9.81 \text{ m/s}^2} = 0.371 \text{ m}$$

➤ Pérdida total del sistema

$$h_t = h_{l_1} + h_{l_2} + h_{l_3} + h_{l_4} \quad (13)$$

$$h_t = 0.126 \text{ m} + 0.0899 \text{ m} + 0.0509 \text{ m} + 0.371 \text{ m} = 0.6378 \text{ m}$$

3.6. Perfil de velocidad del tubo sifón.

Datos a tener en cuenta:

$$f = 0.0145$$

$$D = 0.91 \text{ m}$$

$$v = 1.149 \text{ m/s}$$

$$U_{max} = v(1 + 1.43\sqrt{f})$$

$$U_{max} = 1.149(1 + 1.43\sqrt{0.0145}) = 1.346 \text{ m/s}$$

La velocidad en diferentes partes del perfil fue calculada con la ecuación

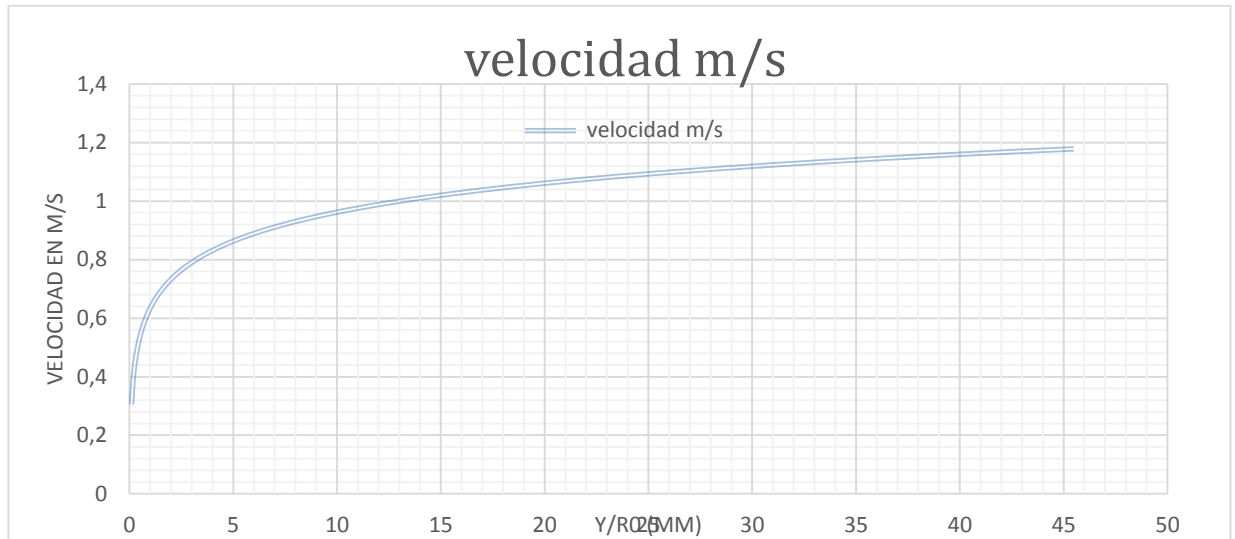
$U = v[1 + 1.43\sqrt{f} + 2.15\log_{10}(1 - y/r_0)]$ Y presentadas en la tabla.6. Y se representó en la gráfica 1.

Tabla 6. Cálculos del perfil de velocidad para el tubo sifón de Tota

perfil de velocidad		
y(mm)	y/r0	u(m/s)
0,5	0,01098901	0,72374027
1	0,02197802	0,82267639
1,5	0,03296703	0,88055031
2	0,04395604	0,92161251
2,5	0,05494505	0,95346283
3	0,06593407	0,97948644
3,5	0,07692308	1,00148908
4	0,08791209	1,02054864
4,5	0,0989011	1,03736036
5	0,10989011	1,05239896
5,5	0,12087912	1,06600302
6	0,13186813	1,07842256
6,5	0,14285714	1,08984743
7	0,15384615	1,10042521
7,5	0,16483516	1,11027288
8	0,17582418	1,11948476
8,5	0,18681319	1,128138
9	0,1978022	1,13629648
9,5	0,20879121	1,14401375
10	0,21978022	1,15133508
12,5	0,27472527	1,1831854
15	0,32967033	1,209209
17,5	0,38461538	1,23121165
20	0,43956044	1,25027121
22,5	0,49450549	1,26708293
25	0,54945055	1,28212152
27,5	0,6043956	1,29572559
30	0,65934066	1,30814513
32,5	0,71428571	1,31957
35	0,76923077	1,33014777
37,5	0,82417582	1,33999545
40	0,87912088	1,3420733
42,5	0,93406593	1,34386056
45	0,98901099	1,34501905
45,5	1	1,3468518

Frente: Autores del proyecto

Grafica 2. Del perfil de velocidad de media sección del perfil viéndose que la velocidad en el centro del tubo es máxima y en la pared es cero



Fuente: Autores del proyecto.

3.7. Caudal crítico para el sifón de Tota.

$$D = 0.91 \text{ m}$$

$$Q_c = 1.19D^{5/2}$$

$$Q_c = 1.19(0.91\text{m})^{5/2} = 0.94 \text{ m}^3/\text{s}$$

Ya que el caudal del sifón en este momento es de $0.747 \text{ m}^3/\text{s}$ y es inferior al caudal crítico, el aire succionado por la pipa se acumula en la cumbre del sifón y al parecer no es lo suficiente como para obstruir el flujo ya que en el momento hay circulación pero se está formando una pérdida de presión debido a la formación de ese soquete.

$$Q_s = 1.59D^{5/2}$$

$$Q_s = 1.57(0.91\text{cm})^{5/2} = 1.24 \text{ m}^3/\text{s}$$

Como se esperaba se necesita un caudal mayor para que las bolsas de aire puedan pasar de la parte alta del sifón y sigan aguas abajo.

3.8. CALCULO DEL COEFICIENTE DE CAVITACIÓN DEL SIFÓN DE TOTA.

Se hicieron los cálculos del coeficiente de cavitación y se muestran en la tabla 7, tabla 8 y tabla 9. mediante la aplicación de la ecuación (23) que está en la página 39

Tabla 7. Con los σ ya calculados, del tramo 2 a 3 del tubo sifón de Tota

Tramo de 2 a 3			
msnm	v(m/s)	P(kPa)	Σ
3013,4	1,149	-0,5745	-0,03799167
3013,6	1,149	-2,5365	-0,04096439
3013,8	1,149	-4,4985	-0,04393712
3014	1,149	-6,4605	-0,04690985
3014,2	1,149	-8,4225	-0,04988258
3014,4	1,149	-10,3845	-0,0528553
3014,6	1,149	-12,3465	-0,05582803
3014,8	1,149	-14,3085	-0,05880076
3015	1,149	-16,2705	-0,06177348
3015,2	1,149	-18,2325	-0,06474621
3015,4	1,149	-20,1945	-0,06771894
3015,6	1,149	-22,1565	-0,07069167
3015,8	1,149	-24,1185	-0,07366439
3016	1,149	-26,0805	-0,07663712
3016,2	1,149	-28,0425	-0,07960985
3016,4	1,149	-30,0045	-0,08258258
3016,6	1,149	-31,9665	-0,0855553
3016,8	1,149	-33,9285	-0,08852803

Fuente: Autores del proyecto

Tabla 8. Coeficiente de cavitación del tubo sifón de Tota. Para el tramo 3 a 4

Tramo de 3 a 4			
msnm	v(m/s)	P(kPa)	Σ
3016,8	1,149	-33,9285	-0,08852803
3016,6	1,149	-31,9665	-0,0855553
3016,4	1,149	-30,0045	-0,08258258
3016,2	1,149	-28,0425	-0,07960985
3016	1,149	-26,0805	-0,07663712
3015,8	1,149	-24,1185	-0,07366439
3015,6	1,149	-22,1565	-0,07069167
3015,4	1,149	-20,1945	-0,06771894
3015,2	1,149	-18,2325	-0,06474621
3015	1,149	-16,2705	-0,06177348
3014,8	1,149	-14,3085	-0,05880076
3014,6	1,149	-12,3465	-0,05582803
3014,4	1,149	-10,3845	-0,0528553
3014,2	1,149	-8,4225	-0,04988258
3014	1,149	-6,4605	-0,04690985
3013,8	1,149	-4,4985	-0,04393712

Fuente: Autores del proyecto

Tabla 9. Coeficiente de cavitación del tubo sifón de Tota. Para el tramo 4 a 5

tramo de 4 a 5			
msnm	v(m/s)	P(kPa)	Σ
3013,8	1,149	-4,4985	-0,04393712
3013,6	1,149	-2,5365	-0,04096439
3013,4	1,149	-0,5745	-0,03799167
3013,2	1,149	1,3875	-0,03501894
3013	1,149	3,3495	-0,03204621
3012,8	1,149	5,3115	-0,02907348
3012,6	1,149	7,2735	-0,02610076
3012,4	1,149	9,2355	-0,02312803
3012,2	1,149	11,1975	-0,0201553
3012	1,149	13,1595	-0,01718258
3011,8	1,149	15,1215	-0,01420985
3011,6	1,149	17,0835	-0,01123712
3011,4	1,149	19,0455	-0,00826439
3011,2	1,149	21,0075	-0,00529167
3011	1,149	22,9695	-0,00231894
3010,8	1,149	24,9315	0,00065379

Fuente: Autores del proyecto

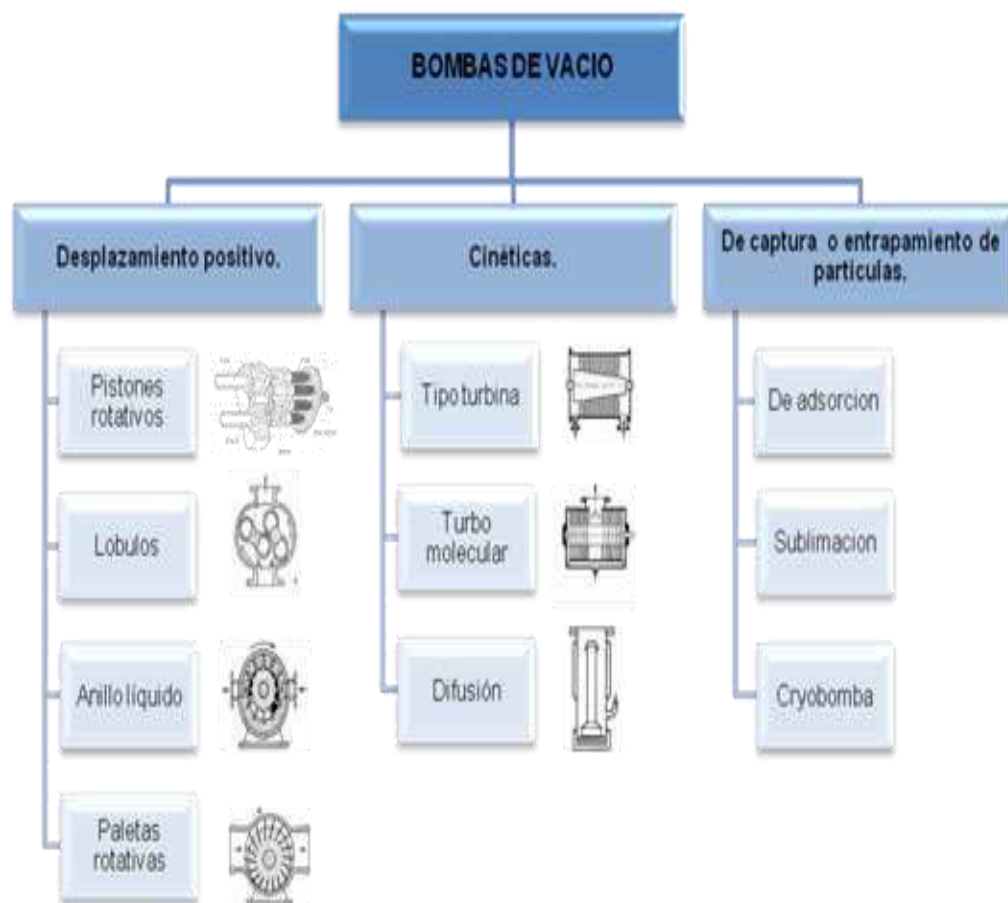
3.9. CÁLCULOS ESTACIÓN DE VACÍO DEL LAGO DE TOTA.

El objetivo de estos cálculos es para hacer una estimación de medidas apropiadas de la tubería de conexión y la capacidad necesaria de la bomba de vacío. También, para calcular el tiempo de encendido de la bomba y la capacidad efectiva de succión de la bomba.

INFORMACIÓN DE BOMBAS DE VACÍO

La parte principal del sistema de vacío es la bomba de vacío, la cual es simplemente un compresor que opera con una presión de entrada menor a la presión atmosférica, en donde sus puertos de entrada y salida están revertidos de forma que la entrada está conectada al sistema de vacío y la salida está abierta a la atmósfera. Estas pueden clasificarse según sus componentes, diseño y función en las categorías mostradas en la Figura 10 y sus rangos de operación se describen en la Tabla 5:

Figura 23. Mapa conceptual bombas de vacío.



Fuente: modificado por los autores de: BANNWARTH, Helmut. Liquid Ring Vacuum Pumps. Alemania. WILEY-VCH 2005.

Tabla 10. Rangos de operación de las bombas de vacío.

Medida de vacío	Ultra alto vacío <10 ⁻⁵ Pa <10 ⁻⁷ mbar	Alto vacío 10 ⁻⁵ a 10 ⁻¹ Pa 10 ⁻⁷ a 10 ⁻³ mbar	Vacío fino 10 ⁻¹ a 10 ² Pa 10 ⁻³ a 1 mbar	Vacío Burdo 10 ² a 10 ⁵ Pa 1 a 10 ³ mbar
Tipo de bomba				
Pistones				
Diafragma				
Anillo líquido				
Paletas rotativas				
Pistones rotativos				
Lóbulos				
Tipo turbina				
Turbo molecular				
Difusión				
Adsorción				
Sublimación				
Criogénica				

Fuente: BANNWARTH, Helmut. Liquid Ring Vacuum Pumps, Compressors and Systems: conventional and hermetical design. Weinheim, Alemania. WILEY-VCH, 2005. 504 p.

MÉTODOS DE MEDICIÓN DE VACÍO

Una amplia variedad de vacuómetro es usado en las aplicaciones de vacío. La selección adecuada del vacuómetro depende del rango de operación, la presencia de gases corrosivos, los requerimientos de procesamiento y el costo.

Por lo anterior y basados en los datos de operación que se muestran en la Tabla 6, permitió la selección de un tipo de vacuómetro "vegabar 14".

Tabla 11. Tipos de vacuómetro y rangos de operación

Tipo de Vacuómetro		Principio de operación	Rango [torr]
Tubo en U		Desplazamiento de una superficie de un líquido	1 -760
Tubo Bourbon		Desplazamiento de una superficie sólida	1-760
McLeod		Desplazamiento de una superficie de un líquido	10 ⁻⁴ -10 ⁻¹
Diafragma		Desplazamiento de una superficie sólida	10 ⁻¹ -760
Piraini		Conductividad térmica del gas	10 ⁻³ – 1
Rotor giratorio		Viscosidad del gas	10 ⁻⁷ – 10 ⁻²
Cátodo caliente		Ionización del gas	10 ⁻² – 10 ⁻⁴

Fuente: KAZAMA, T. y TOTTEN, G. E. Compressors and vacuum pumps. En: Handbook of lubrication and tribology. CRC Press, 2006. 61 p.

El vacuómetro "vegabar 14" fue seleccionado principalmente por su rango, adaptabilidad y costo. Este utiliza las fuerzas generadas de la presión para obtener una medida de ésta y consta de un diafragma el cual se desplaza por la acción del vacío dando una señal normalizada de corriente que facilita hacer un control exacto de la bomba.

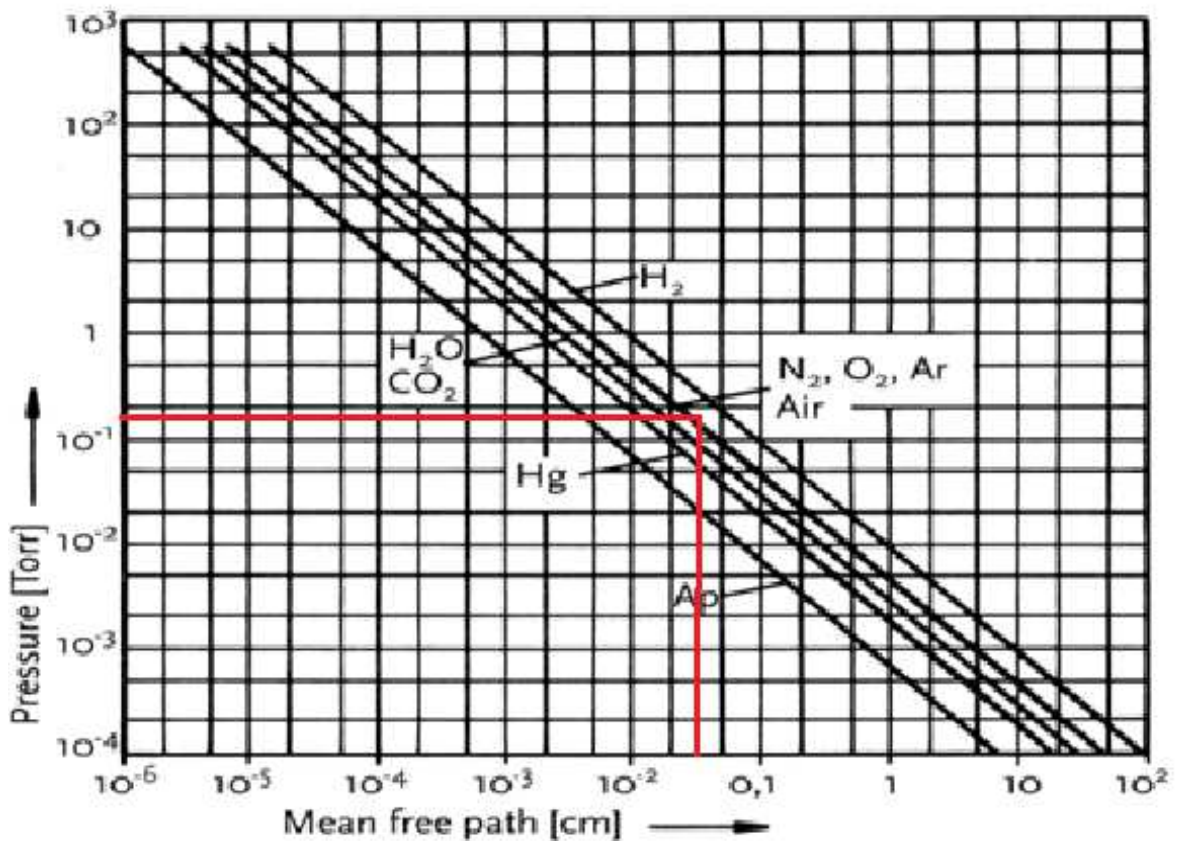
Elección de la bomba

Para elegir la bomba apropiada es necesario hacer los cálculos de la capacidad de succión y el tiempo mínimo de bombeo del sistema, para esto se debe evaluar los diferentes escenarios y así se pueda elegir una bomba acorde al sistema.

Conductancia de la tubería depende del régimen en que se encuentre el fluido. Entonces el régimen en que se encuentra. Suponiendo un diámetro en la entrada de 2 pulgadas y evaluando la condición límite entre el flujo viscoso y el flujo de transición:

$$k = \frac{l}{5.25 \text{ cm}} = 0.01 \rightarrow l = 0.0552 \text{ cm}$$

Tabla 12. Presión contra distancia media libre



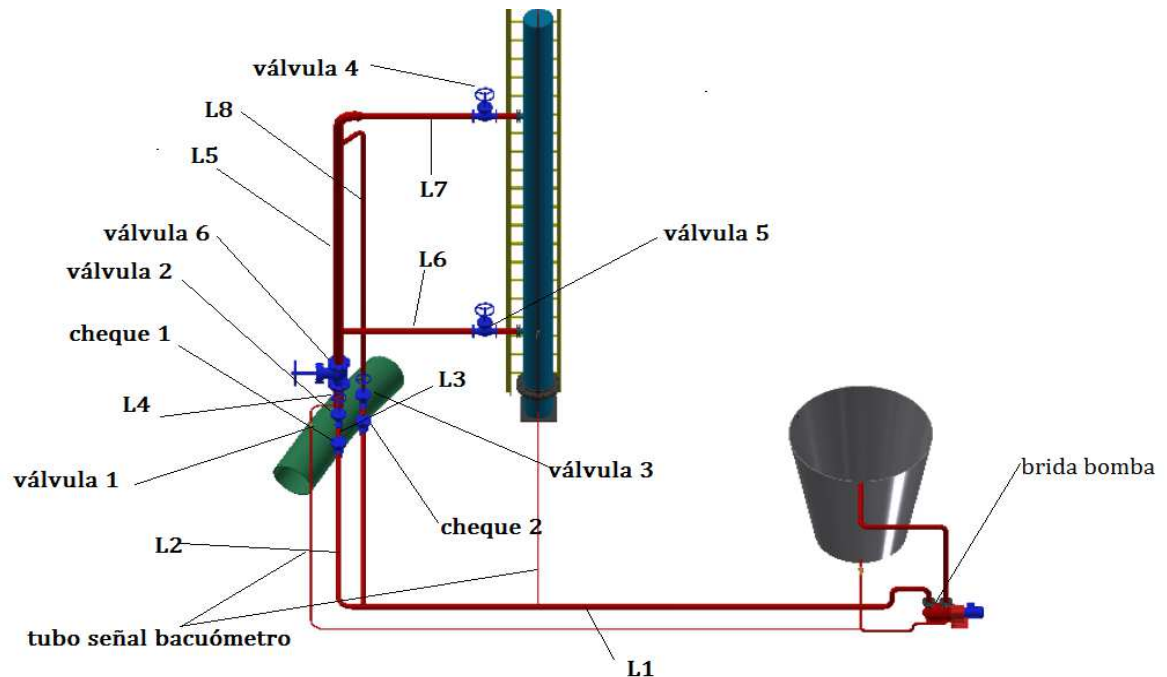
Fuente: BANNWARTH, Helmut. *Liquid Ring Vacuum Pumps*. Alemania. WILEY-VCH 2005

Esta longitud de la trayectoria de las moléculas se alcanza cuando la presión es de 0.3 torr, es inferior a la presión mínima del sistema por lo que éste se encuentra únicamente en el rango de flujo viscoso.

- 3.9.1. Cálculos resistividad. encontrar la resistividad de la tubería es necesaria ya que con esta podemos encontrar la conductancia la cual se utiliza para calcular la capacidad de bombeo y el tiempo de bombeo.

Para el cálculo de la conductancia del sifón hay que tener en cuenta que hay varias formas de realizar el vaciado de la cámara y depende de la configuración de las válvulas que estén abiertas o cerradas (Ver figura 23).

Figura 24. Esquema estación de vacío



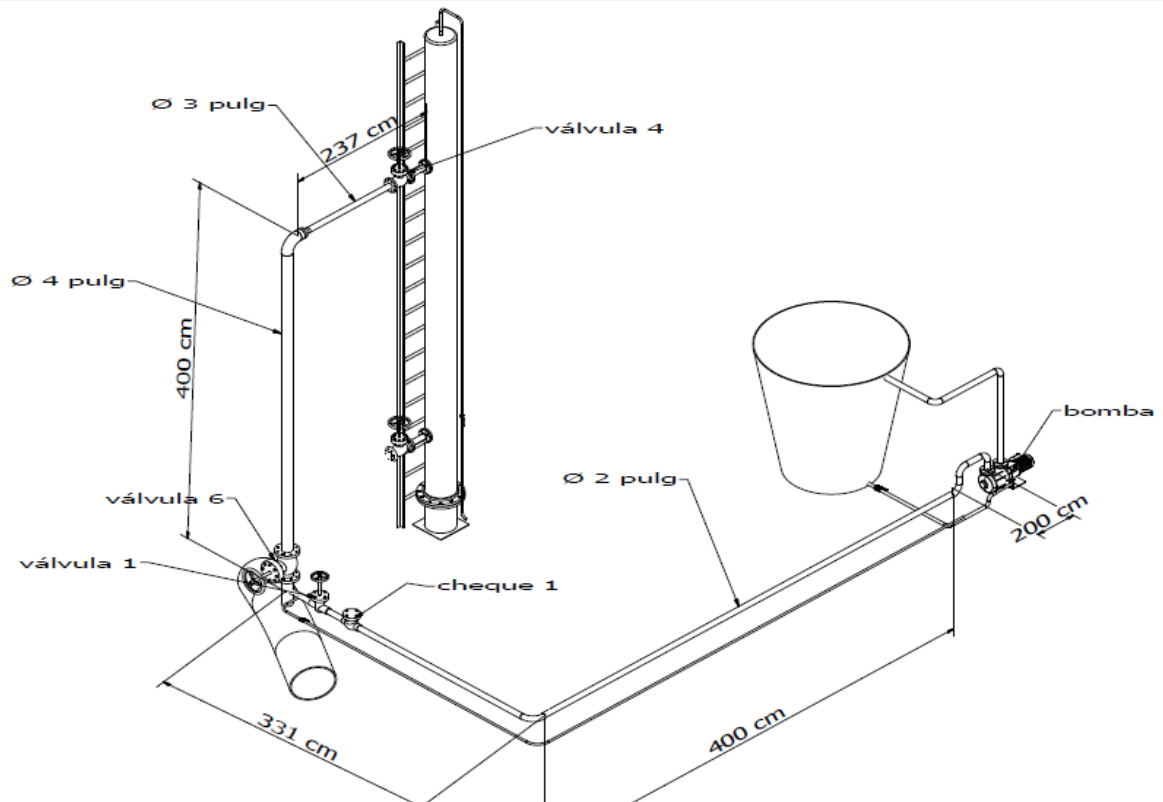
Fuente. Autores del proyecto

En la figura 24 muestra el esquema de la estación de vacío y para efecto de los cálculos en las siguientes figuras solo se mostrará la tubería por la que se está haciendo el vaciado debido a que unas válvulas se consideran cerradas y otras abiertas para evaluar las diferentes configuraciones y se hace para que el lector tenga mejor orientación de qué tubería está haciendo el vaciado con la operación de apertura o cierre de las válvulas.

Caso 1: condiciones (válvula 3 y 5 cerradas las demás abiertas).

El vaciado es realizado desde brida de la bomba en tubería de dos pulgadas y llega hasta el cheque 1 y pasa por la válvula 2 y sigue en 2 pulgadas hasta el comienzo de la tubería de 4 pulgadas y empieza a subir 4m en tubería de 4 pulgadas pasando por la válvula 6 donde se reduce a 3 pulgadas y sigue hasta la válvula 4 donde se conecta con el tanque de vacío.

Figura 25. Esquema conducción caso 1



Fuente. Autores del proyecto

➤ resistividad para el caso 1

$$W_{laminar} = \frac{a}{182 * d^4 * \bar{p}}$$

$$\bar{p} = \frac{(p_1 + p_2)}{2}$$

$$\bar{p} = \frac{(250 \text{ torr} + 25 \text{ torr})}{2} = 137.5 \text{ torr}$$

$$l_1 = 6 \text{ m}$$

$$l_2 = 3.31 \text{ m}$$

$$d = 5.25 \text{ cm}$$

$$l_1 + l_2 = 9.31 \text{ m}$$

$$W_{laminar} = \frac{931 \text{ cm}}{182 * (5.25 \text{ cm})^4 * 137.5 \text{ torr}} = 4.89 * 10^{-5} \frac{s}{l}$$

$$c_1 = \frac{1}{w} = \frac{1}{4.89 * 10^{-5} \frac{s}{l}} = 20420.2765 \frac{l}{s} \rightarrow 73513 \frac{m^3}{h}$$

Conductancia 2

$$d = 10.23 \text{ cm}$$

$$l_4 = 40 \text{ cm}$$

$$l_5 = 400 \text{ cm}$$

$$l_4 + l_5 = 440 \text{ cm}$$

$$W_{laminar} = \frac{440 \text{ cm}}{182 * (10.23 \text{ cm})^4 * 137.5 \text{ torr}} = 1.6053 * 10^{-6} \frac{s}{l}$$

$$c_2 = \frac{1}{w} = \frac{1}{1.3053 * 10^{-6} \frac{s}{l}} = 622908.05 \frac{l}{s} \rightarrow 2242469 \frac{m^3}{h}$$

$$c_2 = 340 \frac{(5.15 \text{ cm})^3}{440 \text{ cm}} = 105.54 \text{ m}^3/h$$

Conductancia 3

$$d = 7.79 \text{ cm}$$

$$l_7 = 230 \text{ cm}$$

$$W_{laminar} = \frac{230 \text{ cm}}{182 * (7.79 \text{ cm})^4 * 137.5 \text{ torr}} = 2.49 * 10^{-6} \frac{s}{l}$$

$$c_2 = \frac{1}{w} = \frac{1}{2.49 * 10^{-6} \frac{s}{l}} = 40678.53 \frac{l}{s} \rightarrow 1442443 \frac{m^3}{h}$$

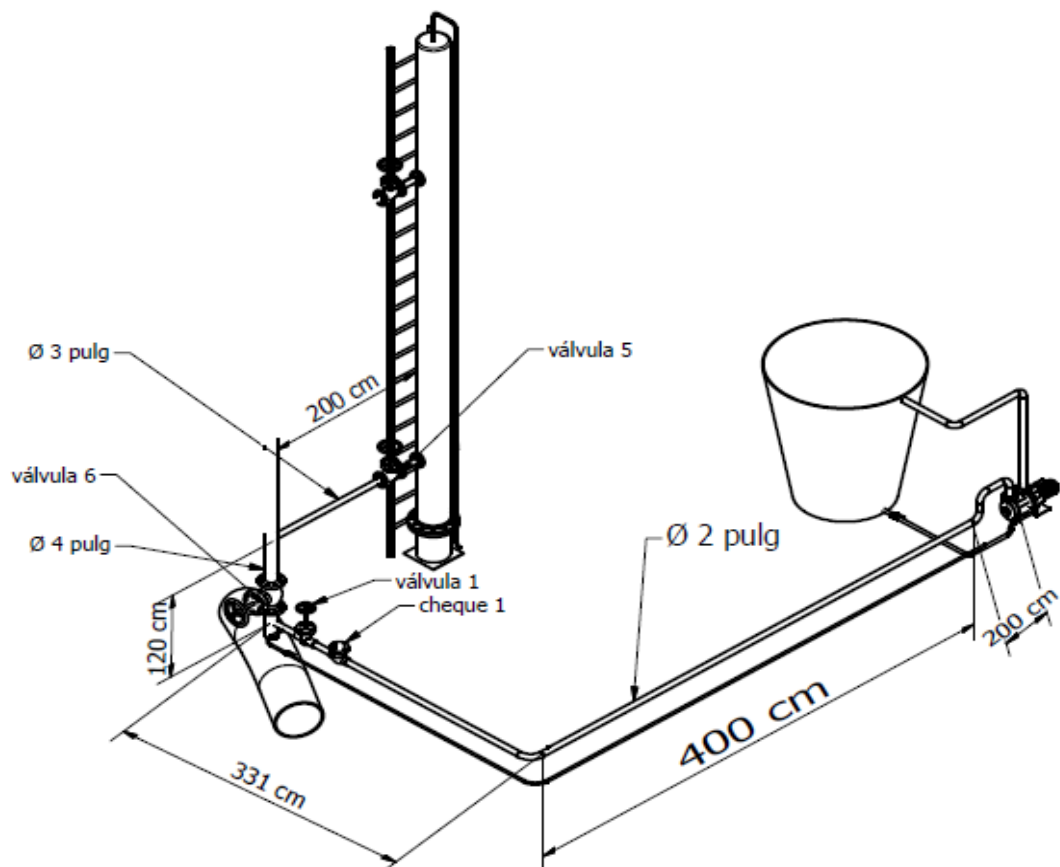
Conductancia total

$$C_{total \text{ caso } 1} = \frac{1}{\frac{1}{73513 \frac{m^3}{h}} + \frac{1}{2242469 \frac{m^3}{h}} + \frac{1}{1442443 \frac{m^3}{h}}} = 67832.13 \frac{m^3}{h}$$

- Caso 2: condiciones (válvula 3 y 4 cerradas las demás abiertas).

Comienza de brida de la bomba en tubería de dos pulgadas y llega hasta el cheque de 1 y sigue hasta la válvula 2 donde comienza a subir en tubería de 4 pulgadas pasando por la válvula 6 de ahí sube 1.2 m y toma una tubería de 3 pulgadas hasta llegar a la válvula 5.

Figura 26. Esquema conducción caso 2



Fuente. Autores del proyecto

- conductancia caso 2
- $l_1 = 6 \text{ m}$
- $l_2 = 3.31 \text{ m}$
- $d = 5.25 \text{ cm}$
- $l_1 + l_2 = 9.31 \text{ m}$

$$W_{laminar} = \frac{931 \text{ cm}}{182 * (5.25 \text{ cm})^4 * 137.5 \text{ torr}} = 4.89 * 10^{-5} \frac{s}{l}$$

$$c_1 = \frac{1}{w} = \frac{1}{4.89 * 10^{-5} \frac{s}{l}} = 20420.2765 \frac{l}{s} \rightarrow 73513 \frac{m^3}{h}$$

Conductancia 4

$$l = 120 \text{ cm}$$

$$d = 10.23 \text{ cm}$$

$$W_{laminar} = \frac{120 \text{ cm}}{182 * (10.23 \text{ cm})^4 * 137.5 \text{ torr}} = 4.38 * 10^{-7} \frac{s}{l}$$

$$c_4 = \frac{1}{w} = \frac{1}{4.38 * 10^{-5} \frac{s}{l}} = 2283996.189 \frac{l}{s} \rightarrow 8222386.2 \frac{m^3}{h}$$

Conductancia 5

$$l_6 = 200 \text{ cm}$$

$$d = 7.79 \text{ cm}$$

$$W_{laminar} = \frac{200 \text{ cm}}{182 * (7.79 \text{ cm})^4 * 137.5 \text{ torr}} = 2.221 * 10^{-6} \frac{s}{l}$$

$$c_5 = \frac{1}{w} = \frac{1}{2.221 * 10^{-6} \frac{s}{l}} = 452402.5 \frac{l}{s} \rightarrow 1628649 \frac{m^3}{h}$$

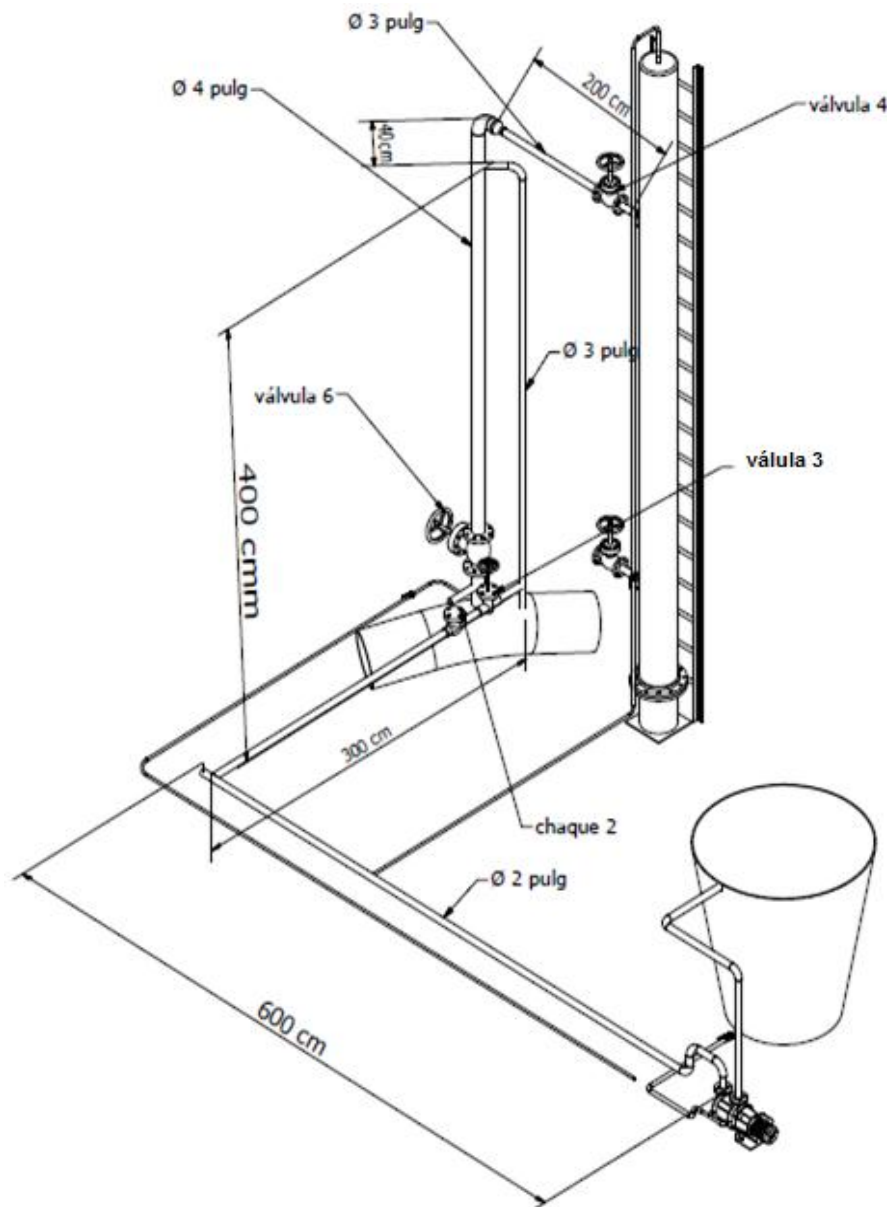
Conductancia total

$$c_{total \text{ caso 2}} = \frac{1}{\frac{1}{73513 \frac{m^3}{h}} + \frac{1}{8222386.2 \frac{m^3}{h}} + \frac{1}{1628649 \frac{m^3}{h}}} = 69749.52 \frac{m^3}{h}$$

- caso 3. Condiciones (válvula 2 y 5 cerradas las demás abiertas).

El vaciado se realiza desde la brida de bomba y avanza en dos pulgadas hasta el cheque 2 y sigue por la válvula 3 y sube en tubería 3 pulgadas después continua hasta la válvula 4 también en tubería de 3 pulgadas donde llega a la torre vacío.

Figura 27. Esquema conducción caso 3



Fuente. Autores del proyecto

conductancia 6

$$l = 900 \text{ cm}$$

$$d = 5.25 \text{ cm Tomado ANEXO E}$$

$$W_{laminar} = \frac{900 \text{ cm}}{182 * (5.25 \text{ cm})^4 * 137.5 \text{ torr}} = 4.73 * 10^{-5} \frac{s}{l}$$

$$c_6 = \frac{1}{w} = \frac{1}{4.73 * 10^{-5} \frac{s}{l}} = 21123.64 \frac{l}{s} \rightarrow 76045.11 \frac{m^3}{h}$$

Conductancia 7

$$l = 640 \text{ m}$$

$$r = 7.79 \text{ cm Tomado ANEXO E}$$

$$W_{laminar} = \frac{640 \text{ cm}}{182 * (7.79 \text{ cm})^4 * 137.5 \text{ torr}} = 6.94 * 10^{-6} \frac{s}{l}$$

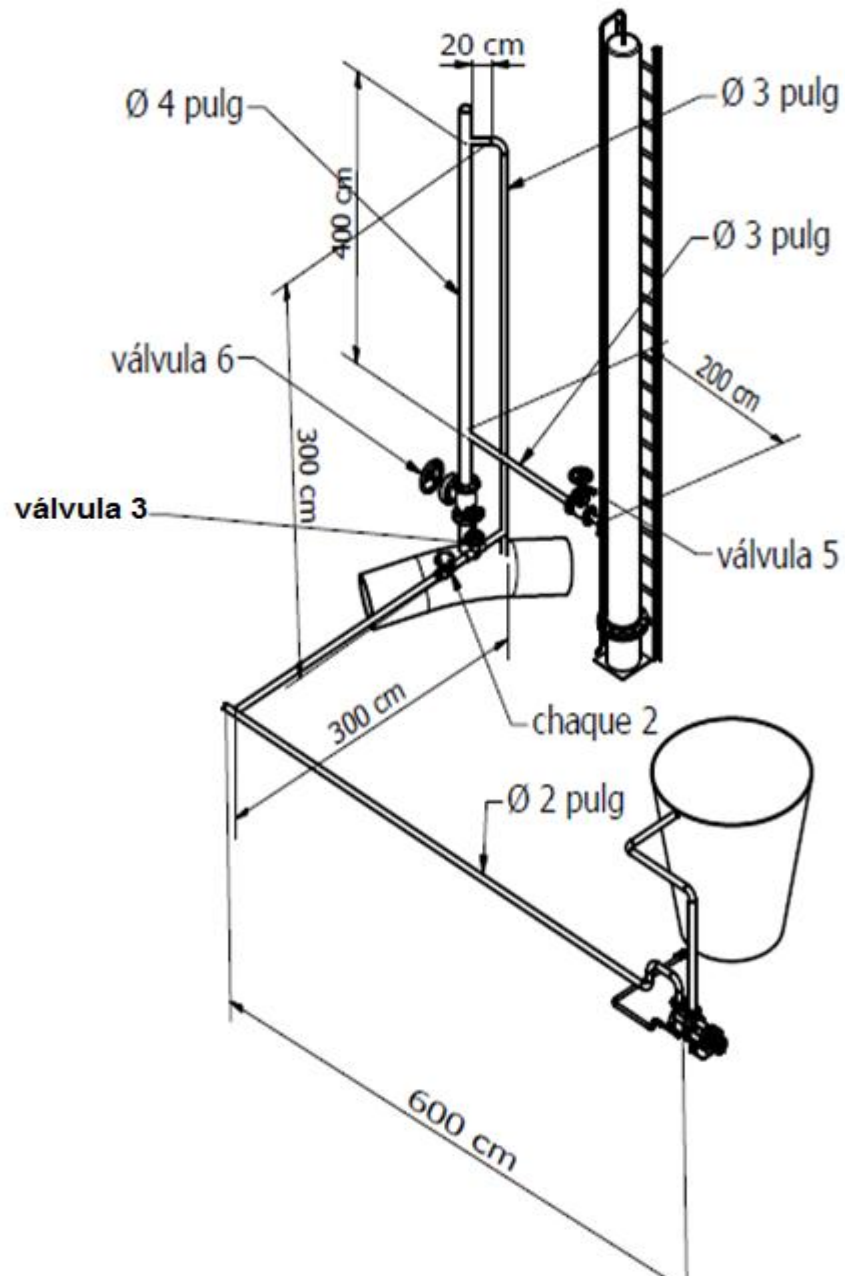
$$c_7 = \frac{1}{w} = \frac{1}{6.94 * 10^{-6} \frac{s}{l}} = 143994 \frac{l}{s} \rightarrow 518378 \frac{m^3}{h}$$

$$C_{total \text{ caso } 3} = \frac{1}{\frac{1}{76045.11 \frac{m^3}{h}} + \frac{1}{518378 \frac{m^3}{h}}} = 66316.6 \frac{m^3}{h}$$

- Caso 4. (Válvula 2 y 4 cerradas las demás abiertas).

El vaciado se realiza desde la bomba y avanza en dos pulgadas hasta el cheque 2 y sigue por la válvula 3 hasta el punto 3 donde sube 4 metros y baja 3.2m en 4 pulgadas luego toma una reducción a tres pulgadas y sigue 2 metros hasta llegar a la válvula 5.

Figura 28. Esquema conducción caso 4



Fuente. Autores del proyecto

$$c_6 = 76045.11 \frac{m^3}{h}$$

$$l = 200 \text{ m}$$

$$r = 5.25 \text{ cm Tomado ANEXO E}$$

$$c_1 = 73513 \frac{m^3}{h}$$

$$P_m = 353.5 \text{ mbar}$$

$$l = 320 \text{ cm}$$

$$r = 5.115 \text{ cm Tomado ANEXO E}$$

$$c_4 = 8222386.2 \frac{m^3}{h}$$

$$l = 380 \text{ cm}$$

$$r = 3.895 \text{ cm Tomado ANEXO E}$$

$$c_5 = 1628649 \frac{m^3}{h}$$

Conductancia total

$$c_{total \text{ caso } 4} = \frac{1}{\frac{1}{76045.11 \frac{m^3}{h}} + \frac{1}{73513 \frac{m^3}{h}} + \frac{1}{8222386.2 \frac{m^3}{h}} + \frac{1}{1628649 \frac{m^3}{h}}} = 36378.52 \frac{m^3}{h}$$

Todas las cuatro configuraciones tienen la suficiente conductancia para hacer el vaciado sin disminuir la efectividad de la bomba, pero también es evidente que el sistema es complejo y al reducir la cantidad de válvulas y longitud de la tubería se reduce el riesgo de la desgasificación y confunde menos al operador del sifón. También se evalúa a continuación un escenario en el que solo se tendrá una tubería de dos metros de longitud y de dos pulgadas de diámetro.

- Caso 5 tubo de 2 pulgadas y de dos metros de longitud.

Este caso se plantea para estimar si es más conveniente hacer un vaciado con una tubería de cuatro pulgadas y a una distancia de dos metros que sería una distancia más prudente. (Ver Anexo K).

- conductancia caso 5
- $l_1 = 200 \text{ cm}$
- $d = 5.25 \text{ cm}$

$$W_{laminar} = \frac{200 \text{ cm}}{182 * (5.25 \text{ cm})^4 * 137.5 \text{ torr}} = 1.052 * 10^{-5} \frac{s}{l}$$

$$c_5 = \frac{1}{w} = \frac{1}{1.052 * 10^{-5} \frac{s}{l}} = 95056.38 \frac{l}{s} \rightarrow 342203 \frac{m^3}{h}$$

Entonces, como se evidencia un incremento de la conductancia se concluye que se puede realizar una mayor extracción de aire.

3.9.2. Calculo de capacidad de bombeo efectiva en la entrada de la bomba. se calcula para estimar cuál de las diferentes ramificaciones actuales es más apropiada o permite una mejor capacidad de bombeo y también se estima para el supuesto de dos metros planteados por medio de la ecuación 36.(ver pág 45)

$$S_{eff} = \frac{C * S_b}{C + S_b}$$

Dónde:

C: Conductancia.

S_b : Velocidad de bombeo en la brida de la bomba.

S_{eff} : Capacidad de bombeo efectiva en la entrada de la bomba.

Para el caso 1.

$$S_b = 178 \frac{m^3}{h}$$

$$c_{total \text{ caso } 1} = 67832.13 \frac{m^3}{h}$$

$$S_{eff} = \frac{C * S_b}{C + S_b} = \frac{67832.13 \frac{m^3}{h} * 178 \frac{m^3}{h}}{67832.13 \frac{m^3}{h} + 178 \frac{m^3}{h}} = 177.53 \frac{m^3}{h}$$

Para el caso 2.

$$S_b = 178 \frac{m^3}{h}$$

$$C_{total \text{ caso } 2} = 69749.52 \frac{m^3}{h}$$

$$S_{eff} = \frac{C * S_b}{C + S_b} = \frac{69749.52 \frac{m^3}{h} * 178 \frac{m^3}{h}}{69749.52 \frac{m^3}{h} + 178 \frac{m^3}{h}} = 177.54 \frac{m^3}{h}$$

Para el caso 3.

$$S_b = 178 \frac{m^3}{h}$$

$$C_{total \text{ caso } 3} = 66316.6 \frac{m^3}{h}$$

$$S_{eff} = \frac{C * S_b}{C + S_b} = \frac{66316.6 \frac{m^3}{h} * 178 \frac{m^3}{h}}{66316.6 \frac{m^3}{h} + 178 \frac{m^3}{h}} = 177.52 \frac{m^3}{h}$$

Para el caso 4.

$$S_b = 178 \frac{m^3}{h}$$

$$C_{total \text{ caso } 4} = 36378.52 \frac{m^3}{h}$$

$$S_{eff} = \frac{C * S_b}{C + S_b} = \frac{36378.52 \frac{m^3}{h} * 178 \frac{m^3}{h}}{36378.52 \frac{m^3}{h} + 178 \frac{m^3}{h}} = 177.13 \frac{m^3}{h}$$

Para el nuevo diseño de dos metros de tubería y de cuatro pulgadas de diámetro.

$$S_b = 178 \frac{m^3}{h}$$

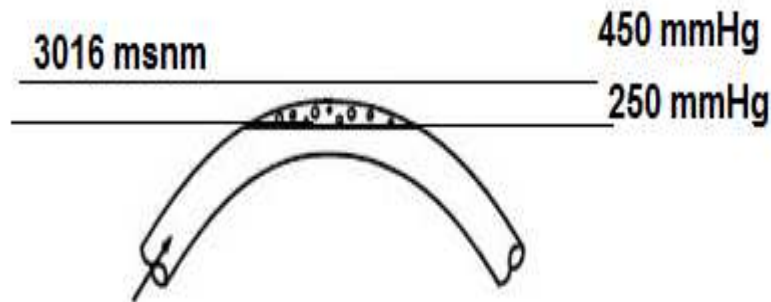
$$c_5 = 342203 \frac{m^3}{h}$$

$$S_{eff} = \frac{C * S_b}{C + S_b} = \frac{342203 \frac{m^3}{h} * 178 \frac{m^3}{h}}{342203 \frac{m^3}{h} + 178 \frac{m^3}{h}} = 177.91 \frac{m^3}{h}$$

3.9.3. Tiempo de bombeo asumiendo que no hay fugas y desgasificación.

Para realizar ese cálculo se debe encontrar el volumen de los gases a extraer del sistema pero se conoce el volumen de la cámara de vacío y de la tubería de conexión, el otro volumen a cuantificar es el que se forma En el tramo del sifón en el que la presión es menor que la atmosférica entonces se libera el aire contenido en el agua y si la velocidad no es suficientemente grande el aire queda retenido en la parte superior de la cresta del sifón impidiendo la normal circulación del agua. Como se ve en la figura 30.

Figura 29. Formación de las burbujas por el efecto del vacío en el sifón



Fuente. Autores del proyecto

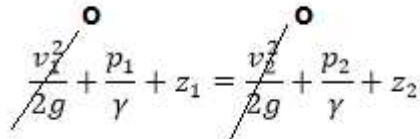
Entonces teniendo en cuenta que la bomba de vacío se enciende a los 250 mmHg y se apaga a los 450 mmHg entonces hay una pérdida de 200 mmhg en presión debido a la formación de burbujas dentro de la cresta del sifón debido al efecto de la presión negativa. Para hallar el volumen de las burbujas a extraer se usa la ecuación de energía para encontrar la pérdida en la carga de presión.

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2$$

$$\gamma = 9.8016 \text{ kN}/\text{M}^3 \text{ del agua a } 12^\circ\text{C}$$

$$v_1 = v_2$$

$$z_1 = 3016 \text{ msnm}$$



$$\cancel{\frac{v_1^2}{2g}} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \cancel{\frac{v_2^2}{2g}} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2$$

$$\frac{-33305.5 \text{ pas}}{9.8016 \text{ kN}/\text{m}^3} + 3016.8 + \frac{59994.9 \text{ pas}}{9.8016 \text{ kN}/\text{m}^3} = z_2$$

$$z_1 = 3019.53 \text{ msnm}$$

Entonces la carga de presión que se pierde es de 3.9 m

Esto significa que la suma del volumen de todas las burbujas generan una pérdida de carga de presión de 3.58 metros y entonces el volumen a extraer es el volumen que hay en 3.58 m en la tubería de 0.91 m de diámetro interno.

$$V_{\text{camara}} = BXH = \pi(0.14\text{m})^2 * 6\text{m} = 0.369 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{gases dentro del sifon}} = (0.45\text{m}^2 * \pi + 3.59\text{m}) = 2.54\text{m}^3$$

$$V = V_{\text{camara}} + V_{\text{gases dentro del sifon}} = 0.369\text{m}^3 + 2.54\text{m}^3 = 2.92 \text{ m}^3$$

$$t = \frac{V}{S_{eff}} \ln \frac{P_i}{P_f}$$

Dónde:

V: volumen de la cámara.

P_i : Presión inicial

P_f : Presión final

S_{eff} : Capacidad de bombeo efectiva de la bomba.

PARA EL CASO 1

$$V = 2.92 \text{ m}^3$$

$$P_F = 450 \text{ mmHg}$$

$$P_i = 250 \text{ mmHg}$$

$$S_{eff} = 177.53 \frac{\text{m}^3}{h}$$

$$t_1 = \frac{2.92}{177.53} \ln \frac{(53.25 - 25)}{(53.25 - 45)} * 60 = 1.2174 \text{ min}$$

PARA EL CASO 2

$$V = 9 \text{ m}^3$$

$$P_F = 450 \text{ mmHg}$$

$$P_i = 250 \text{ mmHg}$$

$$S_{eff} = 177.54 \frac{\text{m}^3}{h}$$

$$t_1 = \frac{2.92}{177.54} \ln \frac{(53.25 - 25)}{(53.25 - 45)} * 60 = 1.214 \text{ min}$$

PARA EL CASO 3

$$V = 9 \text{ m}^3$$

$$P_F = 450 \text{ mmHg}$$

$$P_i = 250 \text{ mmHg}$$

$$S_{eff} = 177.52 \frac{\text{m}^3}{h}$$

$$t_1 = \frac{2.92}{177.52} \ln \frac{(53.25 - 25)}{(53.25 - 45)} * 60 = 1.214$$

PARA EL CASO 4

$$V = 9 \text{ m}^3$$

$$P_F = 450 \text{ mmHg}$$

$$P_i = 250 \text{ mmHg}$$

$$S_{eff} = 177.13 \frac{m^3}{h}$$

$$t_1 = \frac{2.92}{177.13} \ln \frac{(53.25 - 25)}{(53.25 - 45)} * 60 = 1.214 min$$

Para El Caso de la tubería de 2 metros.

$$V = 9 m^3$$

$$P_F = 450 mmHg$$

$$P_i = 250 mmHg$$

$$S_{eff} = 177.91 \frac{m^3}{h}$$

$$t_1 = \frac{9}{177.91} \ln \frac{(53.25 - 25)}{(53.25 - 45)} * 60 = 1.217 min$$

Teniendo en cuenta los cálculos obtenidos se puede llegar a la conclusión que la bomba de anillo líquido de 7.5 Hp de doble etapa es apropiada ya el tiempo que demora no es un tiempo demasiado largo.

3.10. Diseño intercambiador de calor.

El objetivo del intercambiador es de tener un mejor control de la temperatura del líquido de servicio y así poder hacer una recirculación total del sellante. Se tomó la decisión de elegir un intercambiador de espiras de flujos encontrados de agua a agua (ver figura 24) por su diseño simple y el bajo costo de fabricación. Así evitaremos que se caliente el agua a más de 70 grados centígrados que es la temperatura máxima de operación de la bomba.

3.10.1. Dimensionamiento del intercambiador de calor para enfriar el fluido de trabajo de la bomba de vacío.

Para dimensionar del intercambiador de calor haremos las siguientes consideraciones:

- El intercambiador es de flujo encontrado
- Los tubos están limpios y libres de incrustaciones
- No hay pérdidas de calor.
- El coeficiente de transferencia de calor total es constante en toda la longitud del intercambiador.
- Los calores específicos se mantienen constantes.

- La transferencia de calor es ideal, es decir, calor perdido por el fluido frío es igual al calor ganado por el fluido caliente.

Partimos de la ecuación de la tasa de transferencia total de calor

$$Q = U * A * \Delta T_{Lm} \quad (38)$$

Dónde:

Q = tasa de transferencia de calor BTU/h.

U = Coeficiente global de transferencia de calor $\frac{BTU}{h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F}$

A = área de transferencia de calor ft^2

ΔT_{Lm} = diferencia de temperatura media logarítmica $^\circ F$

Para flujo encontrado tenemos

$$\Delta T_{Lm} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{\ln T_1}{T_2}} \quad (39)$$

$$T_1 = T_{h1} - T_{c1} = T_{hi} - T_{co} \quad (40)$$

$$T_2 = T_{h2} - T_{c2} = T_{ho} - T_{ci} \quad (41)$$

Dónde:

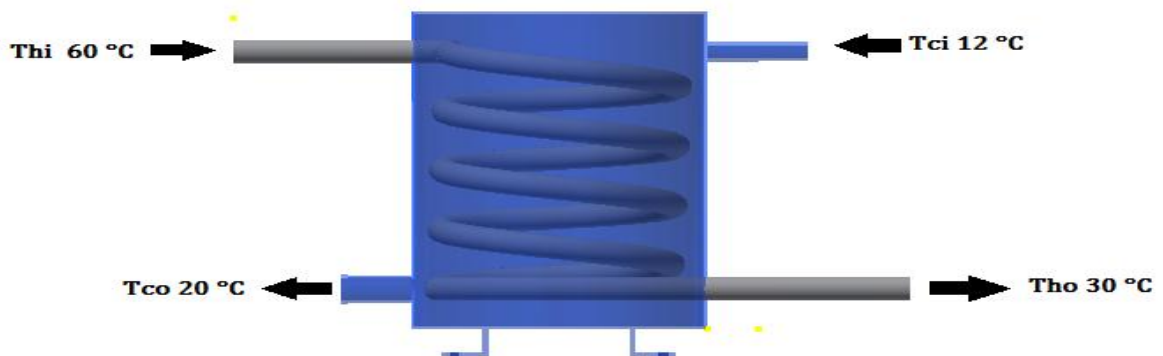
$T_{hi} = 60^\circ C$ ($140^\circ F$) temperatura de entrada fluido caliente.

$T_{co} = 20^\circ C$ ($68^\circ F$) temperatura de salida fluido frío.

$T_{ho} = 30^\circ C$ ($86^\circ F$) temperatura de salida fluido caliente.

$T_{ci} = 12^\circ C$ ($53.6^\circ F$) temperatura de entrada fluido frío.

Figura 30. Intercambiador de calor



Fuente Autores del proyecto

Cálculos del intercambiador de calor para la bomba de vacío del sifón.

Entonces calculamos:

$$\Delta T_{lm} = ((140 - 68) - (86 - 53.6)) / \ln ((140 - 68)/(86 - 53.6))$$
$$\Delta T_{lm} = 49.59 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

Ahora hallamos la cantidad de Calor cedido en el intercambiador necesario para obtener agua fría a las condiciones requeridas.

$$Q = U * Ca * \Delta T \quad (42)$$

Dónde:

G = Flujo de agua en Kg/h.

Ca = 1 Calor específico del agua en Kcal/ Kg $^{\circ}\text{C}$

$\Delta T = T_s - T_e$

Ts = 30 $^{\circ}\text{C}$ temperatura de salida del agua a enfriar.

Te = 60 $^{\circ}\text{C}$ temperatura de entrada del agua a enfriar.

G = 0.72 m^3/h = 720 Kg/h (agua) Líquido de servicio de la bomba de vacío.

Entonces calculamos

$$Q = 720 \times 1 \times (30 - 60) = -21.6 \text{ Kcal / h}$$

$$Q = 21.6 \text{ Kcal / h (calor cedido)}$$

Asumiendo la transferencia de calor ideal, igualo los Q y calculo el flujo de agua en la parte fría.

$$Q = G * Ca * \Delta T$$
$$G = \frac{Q}{(Ca * \Delta T)}$$

Entonces calculamos

$$G = 21.6 / (1 \times (20 - 12))$$

$$G = 2.7 \text{ gpm}$$

Entonces, este caudal de 4.32 gpm es el flujo que se necesita manejar en el intercambiador para lograr enfriar el agua de recirculación para la bomba de vacío. Partiendo de la ecuación de la tasa de transferencia total de calor, asumiendo un valor para el coeficiente global de transferencia de calor U, en base de la situación

física de un intercambiador de calor que trabaja agua con agua, hallamos el valor necesario del área de transferencia para obtener nuestro objetivo.

$$Q = U * A * \Delta T_{Lm}$$

$$A = Q / (U * \Delta T_{Lm})$$

Dónde:

$$Q = 21.6 \text{ Kcal / h} = 85658.4 \text{ BTU / h.}$$

$$U = 200 \text{ BTU / h ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$\Delta T_{Lm} = 49.59 \text{ } ^\circ\text{F}$$

Entonces el valor del área será:

$$A = 8.64 \text{ ft}^2$$

Teniendo ya el valor del área necesaria para lograr enfriar el agua que va a servir de fluido de trabajo para la bomba de vacío. Se va a construir los anillos en tubería de acero inoxidable calibre 80 de dos pulgadas y tiene un diámetro exterior de 60.3 mm.

Calculo de la longitud de la tubería.

$$A_{tubería} = longitud \text{ tubería} * perimetro \text{ tubería} \quad (44)$$

$$longitud \text{ tubería} = \frac{A_{tubería}}{perimetro \text{ tubería}}$$

$$longitud \text{ tubería} = \frac{8.64 \text{ ft}^2}{\pi * 0.198 \text{ ft}} = 13.88 \text{ ft}$$

$$longitud \text{ tubería} = 4.23 \text{ m}$$

Se van a hacer cuatro espiras con un diámetro de 36.45 cm.

Selección de la bomba para la recirculación del intercambiador.

- Bomba de recirculación de agua fría bomba centrífuga MS – 08 de 0.85 CV (SALVADOR ESCODA S.A) conexiones entrada y salida de 2 pulgada.

Esta bomba se eligió por que cumple con los parámetros de diseño del intercambiador.

4. EVALUACIÓN DEL PROYECTO Y CAMBIOS A REALIZAR AL SISTEMA.

El estudio para la optimización del tubo sifón del lago de Tota se abordó en los tres capítulos anteriores. En el primer capítulo se realizó un levantamiento general del estado del sifón y se definió que partes del sifón se deben cambiar para optimizar el sifón y el resultado del este capítulo 1 es:

Se hizo un análisis de la parte eléctrica y del control de la bomba de vacío, se concluyó que la conexión y disponibilidad de energía eléctrica es suficiente. Además, confiable ya que se dispone también de una planta eléctrica auxiliar diésel con un tablero de transferencia de carga.

En cuanto el circuito de potencia de la bomba se hicieron los cálculos de las protecciones adecuadas para el motor tales como: el guardamotor se recomendó un GV2LE32 de SCHNEIDER ELECTRIC, con su respectivo relé térmico LRD32 de SCHNEIDER ELECTRIC, contactor es un LCD1D32 de SCHNEIDER ELECTRIC. También se debe implementar un arrancador suave para proteger el devanado del motor de la bomba el 3RW4027-1BB14 de SIEMENS cumple con las necesidades. El circuito de control de la bomba se evidenció que no tiene paro de emergencia ni pulsador de parada, se tiene que implementar una señal sonora para que el operador tenga el aviso oportuno para cuando ocurra la falla.

El capítulo dos se plantea la fundamentación teórica para el desarrollo del proyecto.

En el tercer capítulo se realizaron los cálculos hidráulicos. Y se encontró que la presión de vacío necesaria para hacer el vaciado en la cresta del sifón vacío mínima debe ser -33.92 kPa. También se concluyó que el tramo ascendente y parte del tramo descendente de la tubería de 36 pulgadas la presión es negativa. Y Que la presión en las válvulas de entrega son de 24.9 kPa. Esto Significa que las válvulas están haciendo presión y reduciendo la velocidad del caudal.

Por otra parte realizaron unos cálculos bajo un nuevo supuesto de las válvulas estén totalmente abiertas y el resultado es que al abrir las válvulas se pasaría de captar $0.747 \frac{m^3}{s}$ a captar $7.251 \frac{m^3}{s}$. El incremento es notablemente en el caudal del sifón. Las pérdidas por calor debido a la fricción se estimaron mediante la ecuación de Darcy. Hay una pérdida de 0.5778 m pero no se pueden disminuir estas pérdidas porque son pérdidas propias, por efecto de la rugosidad de la tubería y la longitud de la misma.

En este capítulo están los cálculos, del caudal critico es de $Q_c = 0.94 \frac{m^3}{s}$, y superar ese caudal critico garantiza que las burbujas de aire que entren al sifón no formen soquetes y las burbujas sigan su curso aguas abajo, entonces, lo recomendable es

darle paso a las válvulas del sifón para que el caudal del sifón sea mayor que $0.94 \frac{m^3}{s}$. Y se hizo el cálculo del coeficiente de cavitación y se plasmó en las tablas del 7 a la 9. Se puede decir que la mayor parte del sifón es propicio para la cavitación ya que el coeficiente entre más cercano a uno, es menos probable que ocurra cavitación, mientras más cercano a cero, es mayor la probabilidad que ocurra cavitación. Lo que indica que el tramo ascendente y parte del tramo descendente se puede presentar cavitación, para disminuir esa posibilidad hay que incrementar el caudal por encima del caudal crítico.

Como conclusión de los cálculos hidráulicos hay que dar más paso a las válvulas del sifón para que el sistema se desempeñe mejor.

- La válvula de purga.

El sifón tiene una válvula en la cresta, el propósito de la válvula es extraer las burbujas de aire del sifón. La válvula censa las burbujas de aire que viajan dentro del sifón, cuando una burbuja pase por este punto dejaría salir las burbujas abriéndoles paso a la atmosfera. Pero en este estudio se pudo establecer que la presión en la cresta es de vacío. Y si la válvula abre paso a la atmosfera entra más aire y perjudica el sistema. Entonces, la válvula se tiene que trasladar después de la cresta donde la presión sea positiva. La válvula se ve en la figura.31

Figura 31. Válvula A.R.I.



Fuente: foto tomada en vista del proyecto.

Con respecto a la estación de vacío, la bomba de anillo líquido funciona sin recirculación. Y Cuando funcionaba con recirculación total el agua del tanque de expansión se calentaba a más de los 70 °C que es la temperatura máxima de trabajo de la bomba, entonces en este estudio se realizó el diseño del intercambiador de calor agua-agua para que la temperatura del agua de servicio de la bomba tenga una temperatura de trabajo estable, alrededor de los 30 °C. Esto garantiza una buena refrigeración de la bomba.

Con respecto a la conexión de la tubería cámara, sifón y bomba de vacío se realizaron los cálculos de conductancia de la tubería. Se estableció que es buena y es importante resaltar que actualmente se está haciendo el vacío con varias configuraciones, con diferentes diámetros en una misma conexión, se decidió recomendar hacer un nuevo diseño el cual solo va tener una sola configuración para hacer el vaciado, con un solo diámetro de tubería.

Se hicieron los cálculos de capacidad de bombeo efectiva de la bomba con las configuraciones actuales y la nueva configuración. Resulto que la configuración actual que más capacidad tiene es la 2 y es de $177.54 \frac{m^3}{h}$, la nueva configuración tendrá $177.91 \frac{m^3}{h}$ lo que da un pequeño incremento, pero esta nueva configuración tiene menos riesgos de fugas y es menos compleja.

En cuanto al tiempo de bombeo, los cálculos están ampliamente más pequeños que los tiempos medidos en campo. Que están promedio de 3.5 minutos, esto significa que al parecer el sistema no es perfectamente hermético y se puede estar presentado retro flujo.

5. CONCLUSIONES.

- Encontrar información de sistemas similares de captación no fue posible, pero se encontró información suficiente en libros, de mecánica de fluidos y catálogos de bombas de vacío lo que facilitó el desarrollo del proyecto.
- En cuanto la estación de vacío hay cuatro formas de hacer el vaciado y las cuatro tienen buena conductancia y no se hace gran diferencia al optar por una o la otra, también es una configuración compleja y tiene diferentes diámetros de tubería lo hace que el operador se confunda, entonces se propone una nueva configuración menos compleja y que tiene también una buena conductancia.
- Con respecto a la cavitación debido a las presiones de vacío el sistema es propicio a presentarse este fenómeno hidrodinámico, pero mientras no se lleve el sistema hasta la presión de vaporización del agua que es de 1.45 kPa para este caso y teniendo en cuenta que la torre de vacío también funciona como chimenea de equilibrio alivia un poco el efecto de este fenómeno cuando se cierran las válvulas del sifón.
- Con respecto la estación de vacío se pudo concluir que la conductancia de los tubos son apropiados pero se puede reducir el riesgo de una fuga de vacío acercando la bomba a la cámara de vacío lo que disminuiría la longitud de la tubería y no se afecta la conductancia del tubo.
- En conclusión para mejorar el desempeño del sifón y optimizar su funcionamiento lo más importante es dar más paso al sifón esto garantiza superar el caudal crítico lo que evita muchos problemas con los gases dentro del sifón, también se puede llegar hasta captar unos $7.2 \frac{m^3}{s}$ con solo darle más paso a las válvulas de entrega del sifón.
- Uno de los factores más importantes es el nivel del lago pero los cálculos se hicieron con el nivel más bajo histórico y se puede decir que entre más alto sea el nivel del lago mejor se desempeñará el sifón pero no dejará de funcionar hasta que el nivel del lago este muy cerca al nivel de la pipa del sifón, también teniendo que la atmósfera local es de 71 kPa se podría alargar la pipa hasta los 3009 msnm unos 70 centímetros más dentro del lago.

6. RECOMENDACIONES.

- Se debe hacer una prueba hidrostática al sistema de vacío ya que los tiempos de encendido de la bomba están por encima de los cálculos hechos en el proyecto lo que indica que se está presentando pequeñas fugas en el sistema de vacío lo que incrementa en tiempo de encendido de la bomba y disminuye el tiempo que tendría que estar apagada.
- Con respecto a la válvula A.R.I. no es apropiado que este en la cresta del sifón ya que en este punto la presión es negativa y cuando la válvula de paso a la atmosfera entrará más aire y perjudica más al sistema, entonces se debe instalar en un lugar adelante de la cresta donde la presión sea positiva y cumpla su función de diseño.
- Se debe hacer una hoja de vida de la bomba de vacío y las válvulas del sistema e implementar el manual de operación de manera rigurosa para evitar prevenir fallas inesperadas.

BIBLIOGRAFÍA

ATURO TALLEDO. Tecnología de alto vacío herramienta básica para el: desarrollo industrial: primera edición lima Perú octubre 2013.

CARLOS ORLANDO HERNÁNDEZ SUÁREZ.CARMEN OFELIA MAIDA VARGAS. Informe de investigación sifón autocebante de garganta: Universidad autónoma de Santa Cruz – Bolivia 2006

GABRIEL CAMARGO PÉREZ. Tota bendición de Nemequeteba: de la academia colombiana de historia y de la sociedad geográfica Colombia.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Compendio tesis y otros trabajos de grado. Quinta actualización. Santa Fe de Bogotá DC: ICONTEC 2002 NTC 1486.

INFORME SOBRE EL FUNCIONAMIENTO DEL TUBO SIFÓN PARA CAPATACION DE AGUA EN EL LAGO DE TOTA. COSERVICIOS S.A E.S.P. Sogamoso 18 de febrero del 2011.

INFORME TUBO SIFÓN. Acerías Paz Del Rio Votorantim 03/03/2013.

RAFAEL MÉNDEZ. Formulación y evaluación de proyectos: Editorial Quevedo Word, Tercera edición.

ROBERT L MOTT. Mecánica de fluidos sexta edición: universidad de Dayton.

TECNOVAC. Curso de vacío internet.(www.tecnovac.es/epages/comersio.mpbile).

ANEXOS

ANEXO A.

ORÍGENES DEL TUBO SIFÓN DEL LAGO DE TOTA

Cuando se terminó el estudio económico y geológico para la construcción de la planta siderúrgica Acerías Paz del Río, tenían que resolver el problema del agua que se requería para la refrigeración de las máquinas y para las demás necesidades de la planta. En ese entonces se pensó en utilizar y embalsar el Río Chiticuy, pero se abandonó esta idea debido a la cercanía del Río de Gámeza a los yacimientos de caliza de Belencito. Y Se ordenaron los estudios de factibilidad que dieron como resultado que se podría construir una represa en donde el Río Gameza que desemboca en el Chicamocha para embalsar $65\,000\text{ m}^3$ de agua, pero por la diferencia de alturas entre la planta y el embalse se tendría que bombear para llevar esa agua a Belencito y se buscó otra alternativa más viable. Se consideró que la mejor alternativa para llevar agua a la planta de Belencito sería del lago de Tota, debido a que la diferencia de 460 m de nivel entre la superficie de las aguas del lago y la planta de Belencito se podría llevar el agua por gravedad, además la cuota embalse garantizaría futuras ampliaciones de la planta.

CONSTRUCCIÓN DEL TUBO SIFÓN DEL LAGO DE TOTA

La firma TIPTON adelantó la construcción del sifón en el año 1952 y se aprovechó un túnel de 400 m de largo que fue construido en el año 1928 para suplir las necesidades de regadío en el valle del Chicamocha. El túnel fue adecuado para alojar un tubo de 91 cm de diámetro interno, y fue puesto en servicio en 1954 para captar 800 l/s de agua para la planta de Belencito y los acueductos de los municipios aledaños del lago de Tota.

RECOMENDACIONES PARA AUMENTAR EL CAUDAL DEL SIFÓN

En el año 1955 la firma TIPTON presentó las recomendaciones por las cuales se podría captar cantidades mayores hasta unos 3000 l/s sin peligro de disminuir el embalse del lago de Tota, siempre y cuando se adelantaran unas adecuaciones tales como:

1. Construir un canal y sus compuertas de regulación para encausar las aguas del Río Olarte hacia el lago.
2. Construcción de un rebosadero en el nacimiento del Río Upía para asegurar una cota máxima de inundación.

CONSTRUCCIÓN DEL CANAL DE CAPTACIÓN POR GRAVEDAD

En el año 1967 se presentaron derrumbes en el túnel del sifón y debido a la falta de espacio entre el túnel y el tubo hace difícil las obras de mantenimiento del mismo por lo que se tendría que tener otro medio de captación si el tubo sifón llegase a fallar. Se presentó un nuevo proyecto el cual cuenta con un canal de captación por gravedad y un túnel circular de 1.8 m de diámetro y 286 m de largo construido de acero revestido el cual lleva el agua al tanque general y fue puesto en servicio en 1973.²

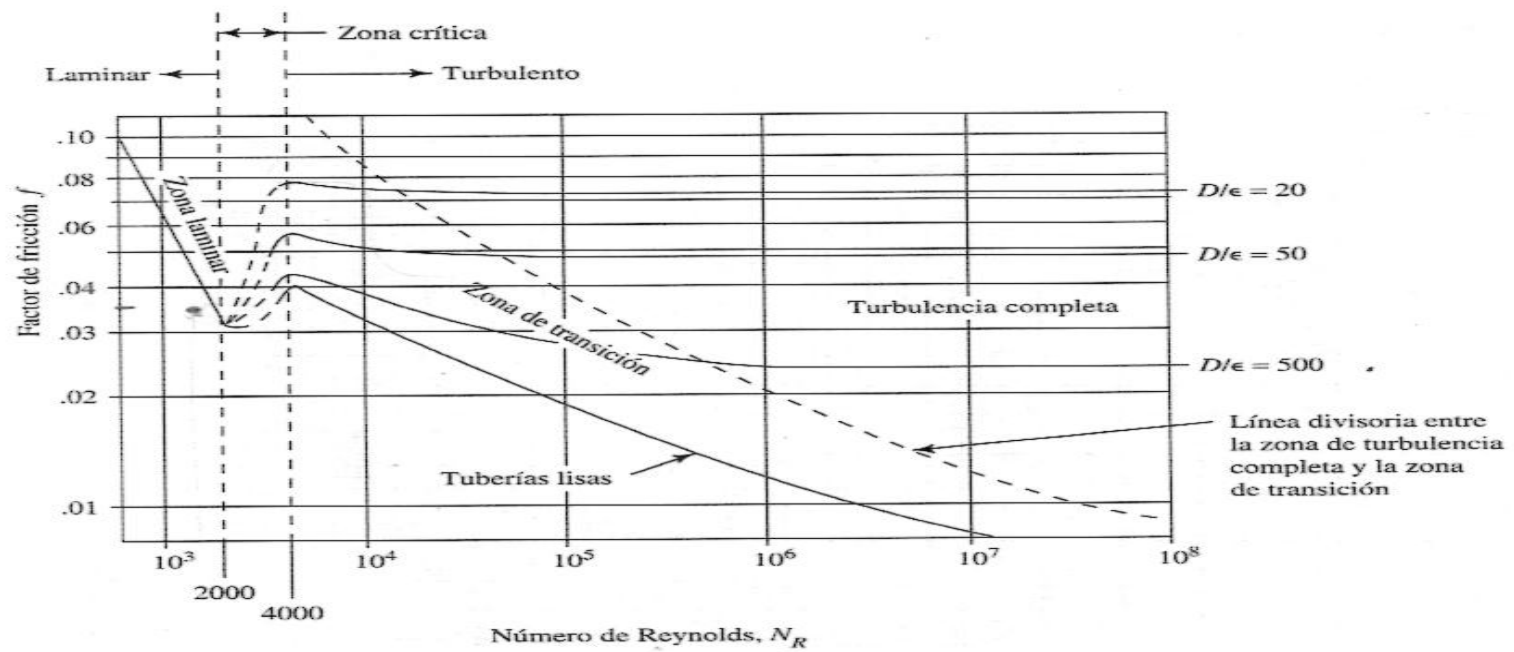
PROLONGACIÓN DEL TUBO SIFÓN EN EL LAGO DE TOTA

Dado que los niveles de lago de Tota han estado bajando, en el año 1976 se comenzó un proyecto para alargar el tubo sifón unos 28 m y profundizarlo 3.50 m con respecto a la posición de la pipa del sifón. Esta obra fue adelantada por el fondo rotario de la Armada Nacional, a cargo del teniente de navío Gabriel Velásquez en compañía de los trabajadores de Acerías Paz Del Río y 5 personas integrantes del equipo de salvamento submarino de la Armada. Desde esta fecha no se han realizado grandes cambios, solo labores de mantenimiento. El sifón fue construido hace 60 años y en el tiempo se han realizado cambios como el alargamiento del tubo de succión y mantenimientos de la pipa de captación también cambio de la bomba de vacío y el reemplazo de una bomba auxiliar que trabajaba a gasolina por una planta eléctrica de 27 kVA accionada por un motor diésel que lo que hace es proporcionar energía a la bomba de vacío cuando se presenta una falla en la red de energía también se cambió los empaques de la válvula de 700 mm y estos cambios hicieron que el comportamiento del sifón sea aceptable pero COSERVICIOS S.A E.S.P. ve que todavía hay que mejorar su desempeño y reducir su consumo energético, por eso el objeto de este estudio es establecer los cambios necesarios para optimizar el funcionamiento del sifón mediante el estudio de la mecánica de fluidos y otras ramas de la ingeniería

² Información recopilada de TOTA BENDICION DE NEMEQUETEBA, Gabriel Camargo Pérez de la academia colombiana de historia y de la sociedad geográfica Colombia

ANEXO B.

Diagrama de Moody



Fuente: Mecánica de fluidos Robert L Mott, sexta edición

Anexo C

CAUDALES DEL TUBO SIFÓN

tubo sifón		
Uso	Usuario	caudal l/s
doméstico y residencial	Coservicios(Sogamoso)	335
Agroindustria	Hacienda la Compañía	137,93
Regadío	Cuítiva	86,76
Regadío	Tota	81,66
Regadío	Cordoncillos	49,77
Domestico	Firavitoba	26,29
Domestico	Tota	4,55
Domestico	Chiguatá	4,44
Domestico	Lagunita	4,4
Domestico	Iza	15
Domestico	Macías	1,43
Total		747.23

Fuente: COSERVICIOS S.A. E.S.P.

ANEXO D

CARACTERÍSTICAS DE LAS BOMBAS DE VACÍO DE ANILLO LÍQUIDO.

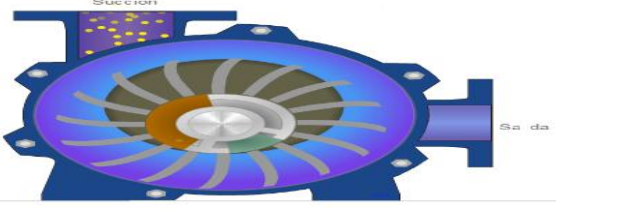
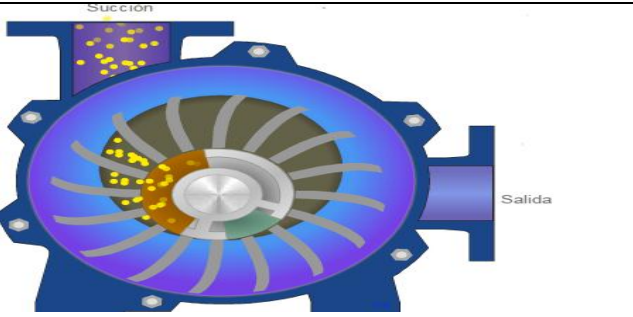



Una bomba de anillo líquido se utiliza para vacío operacional limitado hasta 33-40 mbar a, dependiendo de la temperatura del líquido de anillo. Además es relativamente barata. Su fiabilidad es alta debido a su simplicidad.

Este tipo de bombas se suelen utilizar para manejar mezclas de gases que contienen vapores condensables.

Las ventajas de las bombas de anillo líquido son:

- Diseño más simple que la mayoría de otras bombas de vacío; solamente utilizan un sistema de rotación.
- Puede fabricarse de cualquier metal fundido.
- Pequeños ruidos y vibración.
- Muy pequeño incremento en la temperatura del gas de descarga.
- Puede manejar cargas de gases condensables.
- No se produce ningún tipo de deterioro debido al líquido o pequeñas partículas que puedan entrar con el fluido de proceso.
- Velocidad de giro pequeña (1800 r.p.m. o menor), que maximiza la duración del proceso.
- Se puede poner en funcionamiento o parar continuamente.
- Puede utilizarse cualquier tipo de líquido como líquido sellante, en situaciones donde es posible la mezcla con el vapor del proceso. La siguiente tabla muestra el funcionamiento de una bomba de anillo líquido.

Principio de funcionamiento de una bomba de vacío de anillo líquido.

<p>El aire o gas entra por la succión que es la parte que está conectada a la cámara de vacío.</p>	 <p>Este diagrama muestra la bomba en su primer estado. El rotor está en una posición tal que la succión (entrada superior izquierda) está abierta a la cámara de vacío. El gas (representado por puntos amarillos) comienza a entrar en la cámara. El anillo líquido (línea azul) está en la parte inferior del rotor. La salida (salida lateral derecha) está cerrada.</p>
<p>El aire o gas entra por la lateral de la bomba hasta llegar a la ventana de admisión del cono. Donde es succionado a las cámaras del rotor por el movimiento del anillo líquido, que es semejante a la succión generada por un pistón en un cilindro.</p>	 <p>En este segundo estado, el rotor ha girado un poco. El anillo líquido se ha movido hacia la izquierda, creando una zona de succión que atrae el gas hacia las cámaras del rotor. El gas ya está presente en la cámara. La succión sigue abierta.</p>
<p>Mientras gira el rotor sus cámaras al pasar por la ventana de admisión del cono se llenan de aire o gas, y se observa que el gas queda confinado dentro de las cámaras del rotor y el anillo líquido generado por el movimiento del agua.</p>	 <p>El rotor continúa girando. El anillo líquido se ha movido aún más hacia la izquierda, ahora está completamente dentro de la cámara del rotor, confinando el gas. La succión sigue abierta, pero el gas ya no puede escapar.</p>
<p>El aire o gas es comprimido a medida que el anillo líquido se aproxima a la ventana de descarga del cono. El anillo líquido hace la función del pistón y las cámaras del rotor hacen la función del cilindro.</p>	 <p>El rotor ha girado más. El anillo líquido se ha movido hacia la derecha, acercándose a la ventana de descarga (salida lateral derecha). El gas dentro de la cámara está siendo comprimido por el movimiento del anillo líquido. La succión sigue abierta.</p>
<p>Cuando cada cámara llega a la ventana de descarga del cono. El aire o gas se expulsa a través de ella hacia la descarga de la bomba por un paso interno en la lateral.</p>	 <p>En este último estado, el rotor ha girado lo suficiente para que la cámara llena de gas llegue a la ventana de descarga. El gas es expulsado a través de la salida lateral. El anillo líquido sigue moviéndose hacia la derecha.</p>

ANEXO E



F Dimensiones de tuberías de acero

TABLA F.1 Cédula 40.

Tamaño nom. de tubería (pulg)	Diámetro exterior		Espesor de pared		Diámetro interior			Flujo de área	
	(pulg)	(mm)	(pulg)	(mm)	(pulg)	(pies)	(mm)	(pies ²)	(m ²)
1/8	0.405	10.3	0.068	1.73	0.269	0.0224	6.8	0.000 394	3.660×10^{-5}
1/4	0.540	13.7	0.088	2.24	0.364	0.0303	9.2	0.000 723	6.717×10^{-5}
3/8	0.675	17.1	0.091	2.31	0.493	0.0411	12.5	0.001 33	1.236×10^{-4}
1/2	0.840	21.3	0.109	2.77	0.622	0.0518	15.8	0.002 11	1.960×10^{-4}
3/4	1.050	26.7	0.113	2.87	0.824	0.0687	20.9	0.003 70	3.437×10^{-4}
1	1.315	33.4	0.133	3.38	1.049	0.0874	26.6	0.006 00	5.574×10^{-4}
1 1/4	1.660	42.2	0.140	3.56	1.380	0.1150	35.1	0.010 39	9.653×10^{-4}
1 1/2	1.900	48.3	0.145	3.68	1.610	0.1342	40.9	0.014 14	1.314×10^{-3}
2	2.375	60.3	0.154	3.91	2.067	0.1723	52.5	0.023 33	2.168×10^{-3}
2 1/2	2.875	73.0	0.203	5.16	2.469	0.2058	62.7	0.033 26	3.090×10^{-3}
3	3.500	88.9	0.216	5.49	3.068	0.2557	77.9	0.051 32	4.768×10^{-3}
3 1/2	4.000	101.6	0.226	5.74	3.548	0.2957	90.1	0.068 68	6.381×10^{-3}
4	4.500	114.3	0.237	6.02	4.026	0.3355	102.3	0.088 40	8.213×10^{-3}
5	5.563	141.3	0.258	6.55	5.047	0.4206	128.2	0.139 0	1.291×10^{-2}
6	6.625	168.3	0.280	7.11	6.065	0.5054	154.1	0.200 6	1.864×10^{-2}
8	8.625	219.1	0.322	8.18	7.981	0.6651	202.7	0.347 2	3.226×10^{-2}
10	10.750	273.1	0.365	9.27	10.020	0.8350	254.5	0.547 9	5.090×10^{-2}
12	12.750	323.9	0.406	10.31	11.938	0.9948	303.2	0.777 1	7.219×10^{-2}
14	14.000	355.6	0.437	11.10	13.126	1.094	333.4	0.939 6	8.729×10^{-2}
16	16.000	406.4	0.500	12.70	15.000	1.250	381.0	1.227	0.1140
18	18.000	457.2	0.562	14.27	16.876	1.406	428.7	1.553	0.1443
20	20.000	508.0	0.593	15.06	18.814	1.568	477.9	1.931	0.1794
24	24.000	609.6	0.687	17.45	22.626	1.886	574.7	2.792	0.2594

Fuente: Mecánica de fluidos Robert L Mott, sexta edición

ANEXO F.



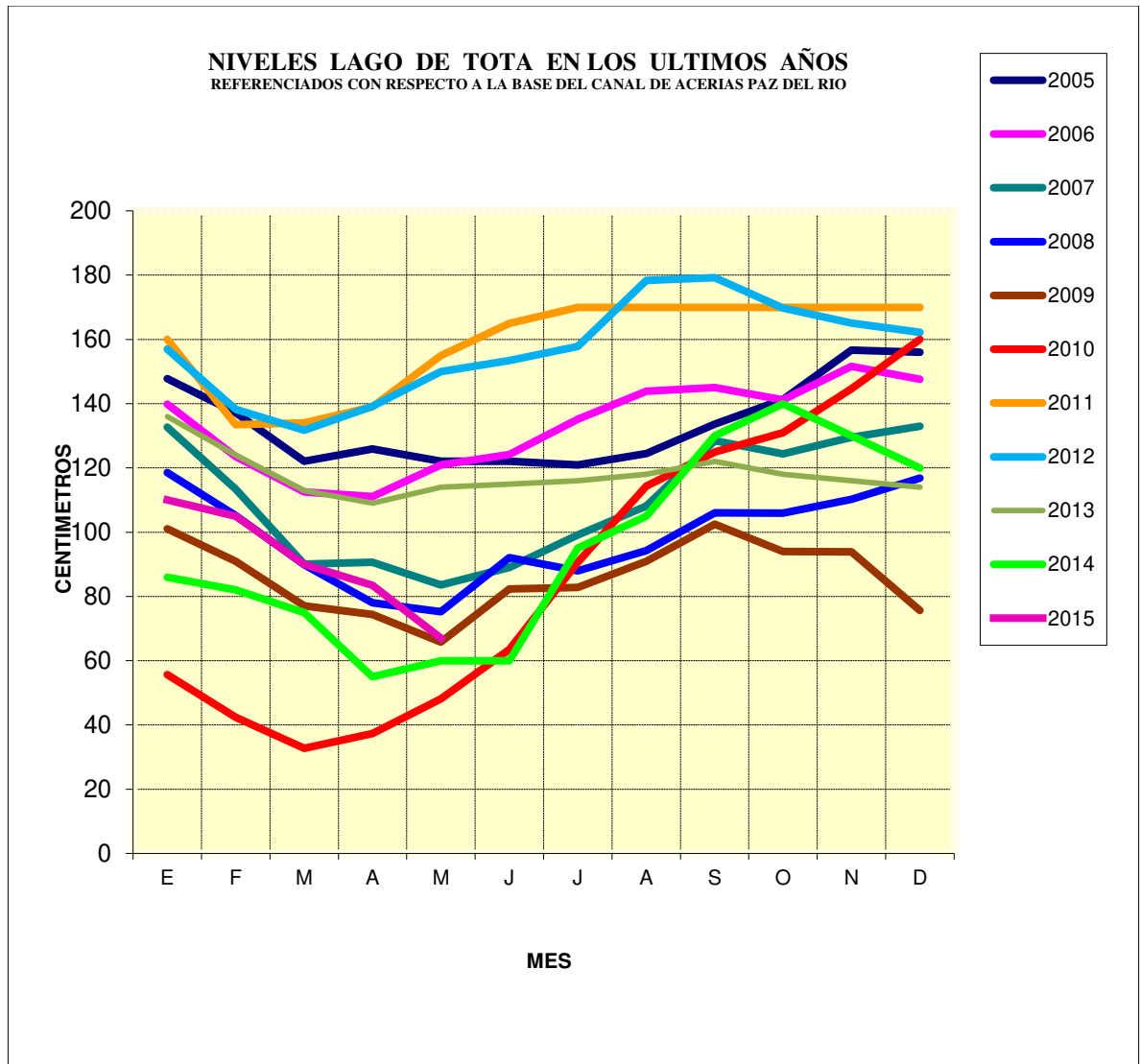
A Propiedades del agua

TABLA A.1 Unidades del SI
[101 kPa (abs)].

Temperatura (°C)	Peso específico γ (kN/m ³)	Densidad ρ (kg/m ³)	Viscosidad dinámica η (Pa·s)	Viscosidad cinemática ν (m ² /s)
0	9.81	1000	1.75×10^{-3}	1.75×10^{-6}
5	9.81	1000	1.52×10^{-3}	1.52×10^{-6}
10	9.81	1000	1.30×10^{-3}	1.30×10^{-6}
15	9.81	1000	1.15×10^{-3}	1.15×10^{-6}
20	9.79	998	1.02×10^{-3}	1.02×10^{-6}
25	9.78	997	8.91×10^{-4}	8.94×10^{-7}
30	9.77	996	8.00×10^{-4}	8.03×10^{-7}
35	9.75	994	7.18×10^{-4}	7.22×10^{-7}
40	9.73	992	6.51×10^{-4}	6.56×10^{-7}
45	9.71	990	5.94×10^{-4}	6.00×10^{-7}
50	9.69	988	5.41×10^{-4}	5.48×10^{-7}
55	9.67	986	4.98×10^{-4}	5.05×10^{-7}
60	9.65	984	4.60×10^{-4}	4.67×10^{-7}
65	9.62	981	4.31×10^{-4}	4.39×10^{-7}
70	9.59	978	4.02×10^{-4}	4.11×10^{-7}
75	9.56	975	3.73×10^{-4}	3.83×10^{-7}
80	9.53	971	3.50×10^{-4}	3.60×10^{-7}
85	9.50	968	3.30×10^{-4}	3.41×10^{-7}
90	9.47	965	3.11×10^{-4}	3.22×10^{-7}
95	9.44	962	2.92×10^{-4}	3.04×10^{-7}
100	9.40	958	2.82×10^{-4}	2.94×10^{-7}

Fuente: Mecánica de fluidos Robert L Mott, sexta edición

ANEXO G



Fuente: COSERVICIOS S.A E.S.P.

La reglilla está en el canal de captación por gravedad y el cero de la reglilla es 3013.16 msnm y este es el cero que se ve en el gráfico, entonces el nivel más bajo del lago fue a mediados de marzo del 2010 con aproximadamente 3013.54 msnm y el más alto a finales de agosto y comienzos de septiembre del 2012 con un nivel aproximado de 3014.96

ANEXO H



SISTEMA DE GESTION DE LA CALIDAD

MANUAL OPERATIVO TUBO SIFON

Versión: 01

PRESENTACIÓN DEL MANUAL

El presente documento tiene como finalidad facilitar cada uno de los procesos en el sistema de captación mostrando de forma simple las definiciones y responsabilidades en la operación y mantenimiento preventivo y correctivo.

MANTENIMIENTO: se refiere a las acciones que se deben realizar en las estructuras y equipos con el fin de prevenir o reparar daños. (UNATSABAR, 2005)

MANTENIMIENTO CORRECTIVO: Acciones que se realizan para reparar daños que se producen por efectos del deterioro o mal funcionamiento de un sistema y que no ha sido posible evitar con el mantenimiento preventivo. (UNATSABAR, 2005)

MANTENIMIENTO PREVENTIVO: Serie de acciones que se realizan para la conservación de las instalaciones y equipos para evitar fallas en su funcionamiento. (UNATSABAR, 2005)

OPERACIÓN: es la acción de hacer funcionar correctamente las obras del sistema de abastecimiento de agua. (UNATSABAR, 2005)

OPERADOR: Persona calificada y responsable de la operación y el mantenimiento de las instalaciones del sistema. (UNATSABAR, 2005)

2 OBJETIVO

GENERALIDADES DE LA EMPRESA

Naturaleza de COSERVICIOS S.A. E.S.P. Es una empresa de servicios públicos de economía Mixta, con carácter de sociedad anónima, sujetas a las reglas del derecho privado, a la jurisdicción ordinaria y a las normas que rijan para las empresas que prestan servicios públicos. Tendrá carácter nacional, con domicilio en el Municipio de Sogamoso, departamento de Boyacá y podrá crear sucursales, agencias o dependencias en otros lugares del país por disposición de la asamblea general y con arreglo a ley, se someterá al control de la Superintendencia de Servicios Públicos “S.S.P” o al organismo que la ley establezca para este tipo de sociedades.

Objetivo Social La compañía tendrá por objeto principal la prestación de servicios públicos domiciliarios de Acueducto, Alcantarillado, Aseo y Alumbrado Público.

Misión COSERVICIOS S.A. E.S.P., es una organización especializada en la prestación de servicios públicos y complementarios, de manera eficiente, con innovación tecnológica y talento humano comprometido con esta función social Consolidamos nuestra permanencia con principios, valores y políticas que nos permiten mantener un desarrollo sostenible.

Visión Posicionar nuestra organización con calidad, competitividad y liderazgo para ser reconocida como una de las mejores empresas prestadoras de servicios públicos a nivel nacional.

Aspectos Legales Ley 142 de 1994, régimen de los servicios públicos domiciliarios: esta ley se aplica a los servicios públicos domiciliarios de acueducto, alcantarillado, aseo, energía eléctrica, distribución de gas combustible, telefonía fija pública y local móvil en el sector rural y otras disposiciones. Decreto 1575 de 2007 y Resolución 2115 de 2007

RESUMEN

El tubo sifón consta principalmente de una tubería de 91 cm de diámetro interior el cual toma el agua del lago y en el otro extremo lo entrega a los acueductos regionales y el de la ciudad de Sogamoso, el sifón se opera manualmente las válvulas y la bomba de vacío funciona de manera automática y manual. Este manual es una guía de como manipular las válvulas y como hacer un cargue del sifón después de una parada por algún caso eventual o por una parada de mantenimiento.

ETAPAS DEL PROCESO

Fuente: lago de Tota ubicado en los Municipios de Aquitania, Cuitiva y Tota, con un área de 20.1 km^2 , almacena un volumen de $1.942.000 \text{ m}^3$, con una profundidad promedio de 30m, posee un perímetro de 46 Km y esta localizada a 3015 m.s.n.m.

CAPTACIÓN

Se realiza en el extremo occidental del LAGO, “ *Boquerón de cuitiva*” mediante una captación tipo *sifón invertido* (*de propiedad de Acerías Paz del Río*), el tubo esta instalado dentro del Lago a 123 m a partir de la rivera, esta situación hace que el agua que se capta tenga una característica constante a nivel organoléptico y físico-químico durante todo el año; la red instalada tiene un diámetro de $\phi 36"$ el cual atraviesa la montaña mediante un tunel de 456 metros de longitud, hasta los tanques de distribución. Este tubo capta 700 lps de los cuales 250 lps son suministrados a las redes de COSERVICIOS S.A. E.S.P. mediante conexión expedida por Corpoboyaca.

Operación y mantenimiento. El mantenimiento debe ser riguroso, permanente y va dirigido a ejecutar las acciones necesarias para mantener el sifón en operación. Y la frecuencia de los mantenimientos se ejecuta de acuerdo a la exigencia de cada requerimiento y serán reportadas en las hojas de seguimiento que están al final de este manual.

La conducción. Está conformada además de la tubería por accesorios como válvulas.

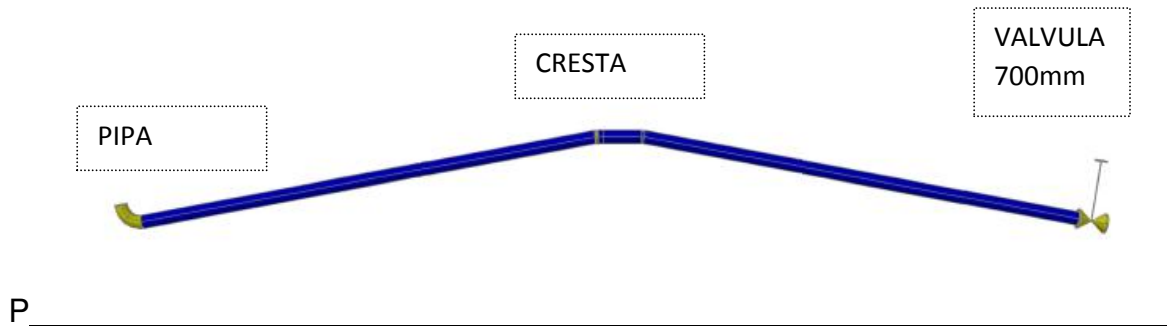
La operación. Se limita al manejo de las válvulas de acuerdo con su función así como:

- Comprobar la estabilidad del terreno por donde cruzan las tuberías.
- Verificar la estabilidad de las estructuras de apoyo de las tuberías (bridas y anclajes).
- Supervisar el correcto funcionamiento de los componentes, accesorios especialmente en las válvulas.
- Vigilar en informar sobre la ocurrencia de fugas.
- Tomar diariamente las lecturas de los macro medidores.
- Semanalmente, el funcionario encargado de realizar una inspección visual y hacer un informe por escrito de las labores realizadas y las anomalías, así como los correctivos tomados.

El mantenimiento preventivo. Se realiza mediante la inspección de la tubería y las válvulas con el objetivo de detectar puntos de riesgo, como fugas mal funcionamiento del sifón. Las actividades para llevar a cabo dicho mantenimiento son las siguientes:

- Abrir las válvulas para eliminar los depósitos de materiales sedimentados e incrustados que se hayan formado en sus paredes, cada 6 meses.
- Por lo menos una vez al año, operar las válvulas de cierre y apertura (purgas, ventosas y derivaciones) dándoles tan solo unas pocas vueltas.
- Drenar, limpiar y engrasar los mecanismos de operación y los tornillos de las uniones de montaje de cada uno de los componentes del sistema cada 6 meses.
- Hacer mantenimientos de prados y pintar las tuberías que se encuentran expuestas al ambiente y la cámara de vacío cada 12 meses.
- Así mismo, en todas las actividades de mantenimiento realizadas se debe llevar el registro en la planilla respectiva. El mantenimiento correctivo se refiere a la reparación de la tubería.

PUESTA EN MARCHA DEL SIFÓN DESPUÉS DE UNA DESCARGA.



El sifón tiene tres partes fundamentales pero solo dos de las tres son manipulables por parte de los operadores del sifón, y son la válvula de 700 mm que es la que permite el paso de agua del sifón al canal de captación o viceversa. La otra sección que los operadores pueden manipular es la estación de vacío que está en la cresta del sifón y la pipa ya que está sumergida dentro del lago no es manipulable ya que solo cumple la función de filtrar que no entren elementos extraños al sifón.

Cebado del sifón después de una parada.

Para que la bomba de vacío tenga que extraer menor cantidad de aire y gases de la tubería se debe abrir la válvula de 700mm y cerrar las válvulas de entrega del sifón para que fluya agua del canal de captación por gravedad dentro del sifón y no se vaya agua abajo por las válvulas de entrega del sifón, y luego pone en marcha la bomba de vacío en modo automático (pasando el selector del tablero de control a modo automático) y dejar hasta que la presión del vacuómetro empiece a bajar a valores cercanos de los 200 Torricelli en ese momento se debe cerrar la válvula de 700 mm y dejar que la bomba siga operando hasta cerca de los 300 Torricelli para abrir las válvulas de entrega del sifón para que el sifón termine de cebarse y comience la circulación por gravedad.

Válvula de 700 mm



Tablero control de la bomba



FORMA DE OPERACIÓN DE LA PLANTA ELECTRICA DE 27.7 kVA

La operación de la planta eléctrica de emergencia es extremadamente sencilla y Puede funcionar en dos modalidades:

- Modalidad automática
- Modalidad manual

OPERACIÓN AUTOMATICA

a) Los selectores del control maestro deben estar ubicados en la posición de automático. El control maestro es una tarjeta electrónica que se encarga de controlar y proteger el motor de la planta eléctrica.

b) En caso de fallar la energía normal suministrada por la compañía de servicios eléctricos, la planta arrancará con un retardo de 3 a 5 segundos después del corte del fluido eléctrico. Luego la energía eléctrica generada por la planta es conducida a los diferentes circuitos del sistema de emergencia a través del panel de transferencia, a esta operación se le conoce como transferencia de energía.

c) Después de 25 segundos de normalizado el servicio de energía eléctrica de la compañía suministradora, automáticamente se realiza la re transferencia (la carga es alimentada nuevamente por la energía eléctrica del servicio normal) quedando aproximadamente 5 minutos encendida la planta para el enfriamiento del motor. El apagado del equipo es automático.

OPERACIÓN MANUAL

En esta modalidad, se verifica el buen funcionamiento de la planta sin interrumpir la alimentación normal de la energía eléctrica.

El selector de control maestro debe colocarse en la posición de “Manual”. Como medida de seguridad para que la planta eléctrica trabaje sin carga (en vacío), se debe colocar el interruptor principal “Main” del generador en posición de apagado off.

Recomendación:

El arranque manual es solo para realizar pruebas.

MANTENIMIENTO PREVENTIVO A REALIZAR POR EL OPERADOR

1. Antes de encender la planta eléctrica revisar:

- Nivel de aceite en el cárter
- Nivel de agua en celdas de batería
- Nivel de combustible en tanque diario
- Verificar limpieza en terminales de batería.
- Colocar el interruptor principal del generador "MAIN " en OFF
- Colocar los selectores de operación en el modo manual para arrancar la planta eléctrica.
- Se pone a funcionar de esta manera por unos 10 minutos y se revisa lo siguiente:
- Frecuencia del generador (60 a 61Hz).
- De ser necesario se ajusta el voltaje al valor correcto por medio del potenciómetro de ajuste.
- Si todo está correcto se acciona el interruptor en la posición de apagado "off" para que el motor se apague.

Luego de la revisión preliminar y si todo está correcto simular falla del fluido Eléctrico y revisar lo siguiente:

- Corriente, voltaje y frecuencia del generador según los parámetros de operación (Que pueden variar de un sistema a otro).
- Si alguno de estos valores está fuera de su rango de operación, notifique de Inmediato al Departamento de Mantenimiento COSERVICIOS S.A E.S.P.
- Si la presión del aceite es muy baja para el motor, esperar que se enfríe, Luego revisar el nivel de aceite y reponerlo en caso de ser necesario (con el motor apagado). Después volver a encender el motor. Si la presión no estabiliza, llamar al personal de Mantenimiento COSERVICIOS S.A E.S.P.
- Si el amperímetro que señala la carga del alternador al acumulador proporciona una señal negativa, significa que el alternador no está cargando. En este caso se debe verificar el estado del alternador, regulador de voltaje y conexiones.
- Si la frecuencia del generador baja a un punto peligroso, personal autorizado debe calibrar al generador del motor a fin de compensar la caída de frecuencia. Es normal que el generador trabajando a plena carga baje un poco su frecuencia.

- Si el voltaje del generador baja su valor, es posible recuperarlo girando el potenciómetro del regulador de voltaje.
- Si en el trabajo de la planta llegan a actuar las protecciones, debe verificar la presión del aceite. Si actúa la protección por alta Temperatura dejar que el motor enfríe y después reponer el faltante de aceite.
- Para detener el motor, desconecte la carga manualmente y deje trabajar el Motor durante tres minutos al vacío.
- Conviene arrancar el motor por lo menos una vez a la semana por un lapso de 30 minutos, para mantener bien cargado el acumulador, cuando no existe cargador de baterías conectado a la planta; y para mantener el magnetismo remanente del generador en buen rango. También para corregir posibles fallas.
- Cualquier duda o anomalía observada reportarla al personal de mantenimiento de COSERVICIOS S. A E.S .P.

PUNTOS IMPORTANTES DE MANTENIMIENTO PARA EL OPERADOR

1. Verificar diariamente:

- Nivel de aceite en el *cárter*.
- Nivel de combustible en el tanque.
- Válvulas de combustible abiertas.
- Nivel de agua destilada en las baterías y limpieza de los bornes.
- Limpieza y buen estado del filtro de aire.
- Que no haya fugas de aceite y/o combustible.
- Observar si hay tornillos flojos, elementos caídos, sucios o faltantes en el motor y tableros.

Semanalmente, además de lo anterior:

- Operar la planta en vacío y si se puede con carga para comprobar que todos sus elementos operan satisfactoriamente, durante unos treinta minutos por lo menos.
- Limpiar el polvo que se haya acumulado sobre la planta o en los pasos de aire de enfriamiento, asimismo los tableros.

Mensualmente Comprobar todos los puntos anteriores, además:

- Comprobar la tensión correcta y el buen estado de las fajas del ventilador, alternador, etc.

- Limpiar los tableros y contactos de relevadores si es necesario.

Observe cuidadosamente todos los elementos de la planta y tableros para Corregir posibles fallas.

Cada 150 horas de trabajo, además de lo anterior:

- Cambiar filtro de aceite.
- Si el motor está equipado con filtro de aire o tipo húmedo cambiarle el aceite.

•

Cada 300 horas de trabajo, además de lo anterior:

- Cambiar los filtros de combustible.

Cada año:

- Si el filtro de aire es tipo seco, cambiarlo.
- Para tiempos mayores, consultar el manual de operación y mantenimiento del Motor en particular.

NOTA: Los cambios regulares de aceite se deben hacer a las 150 horas de Trabajo o a los 6 meses, lo que ocurra primero.

VII. RECOMENDACIONES GENERALES PARA LOS OPERADORES DE PLANTAS ELÉCTRICAS.

Diez reglas que deben observarse:



- Procure que no entre tierra y polvo al motor, al generador y al interior de los tableros de control y transferencia.
- Cerciórese de que esté bien dosificado el combustible para el motor sin impurezas y obstrucciones
- Compruebe que al operar la planta se conservan dentro de los valores normales las de los embobinados del generador, de los tableros, del motor del interruptor de transferencia, etc.
- Los motores nuevos traen un aditivo que los protege de la corrosión interna. Al igual que en los motores usados, después de algún tiempo necesitan protegerse con aditivos, los cuales duran períodos determinados. Después hay que suministrarle otro que los proteja. Además hay que evitar fugas y goteras sobre partes metálicas; en general hay que evitar la corrosión a todos costos.

- Se debe procurar que se tengan siempre los medios de suministro de aire, por ejemplo:
 - Aire limpio para la operación del motor.
 - Aire fresco para el enfriamiento del motor y generador.
 - Medios para desalojar el aire caliente.
- Compruebe siempre que la planta gira a la velocidad correcta por medio de su frecuencímetro y tacómetro.
- Conozca siempre el buen estado de la planta en general.
- Reportar al personal de mantenimiento las fallas en cuanto aparezcan, por muy sencillas que se vean.
- Cuando el motor del interruptor de transferencia derrame lubricante, éste deberá sustituirse por grasa nueva.
- Recorra al personal de Mantenimiento para implantar un programa de mantenimiento. Abra un expediente para anotar todos los datos en la ficha de vida de la planta y por medio de ella compruebe la correcta aplicación del mantenimiento.

[illegible]

REPORTE DE NOVEDAD

REPORTE No.				DEPARTAMENTO:				FECHA:			
MAQUINA/EQUIPO:				MARCA:				CODIGO:			
UBICACIÓN:				SECCION:				SERIE:			
MANTENIMIENTO:	PREVENTIVO		CORRECTIVO	OTRO:	PROBELMA			ELECTRICO	ELECTRONICO:	OTRO:	
CONDICION:	CRITICA		MEDIA	NORMAL	INFORMO:	TURNOS A	TURNOS B	TURNOS C			
MECANISMO:	MECANICO - ELECTRICO										
DESCRIPCION GENERAL DEL FALLO / AVERIA:											
OBSERVACIONES:											
EJECUTADO POR:				CONOCIO:				RECIBIO:			

 		SOLICITUD DE SERVICIO DE MANTENIMIENTO													
SOLICITUD No.					DEPARTAMENTO:				FECHA:						
MAQUINA/EQUIPO:					MARCA:				CODIGO:						
UBICACIÓN:					SECCION:				SERIE:						
MANTENIMIENTO:					CORRECTIVO		<input type="checkbox"/>		OTRO:		<input type="checkbox"/>				
CONDICION:		CRITICA			MEDIA		<input type="checkbox"/>		NORMAL		<input type="checkbox"/>				
MECANISMO:					PROBELMA		<input type="checkbox"/>		MECANICO.		<input type="checkbox"/>				
					ELECTRICO		<input type="checkbox"/>		ELECTRONICO:		<input type="checkbox"/>				
					OTRO:		<input type="checkbox"/>								
SERVICIO SOLICITADO		SOLICITANTE			RESPONSABLE			DESCRIPCION DEL TRABAJO							
REVISION															
AJUSTE															
DESMONTAJE															
REPARACION															
LUBRICACION															
TRASLADO															
REFORMA															
PROYECTO															
ADECUACION															
PINTURA															
LIMPIEZA															
OBSERVACIONES:															
EJECUTADO POR:								CONOCIO:				RECIBIO:			

